

Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP

Miguel Ângelo Moura Rodrigues

Dissertação de Mestrado

Orientador (FEUP): Prof. Dr. António Torres Marques

Co-Orientador (FEUP): Prof. Dr. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Co-Orientador (INEGI): Eng. Santiago David Castellanos Villa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2018

Aos meus pais e à minha família

Resumo

Os materiais compósitos têm assumido uma importância cada vez maior na indústria. As elevadas propriedades específicas, assim como a elevada flexibilidade na obtenção de materiais adaptados às exigências de cada projeto, têm levado a uma procura cada vez superior. Os compósitos híbridos metal/compósito têm uma utilização abundante na indústria aeronáutica e ultimamente têm vindo, também, a ser alvo de investigação na indústria automóvel.

Como os processos de fabrico de compósitos permitem obter as geometrias finais dos produtos, a furação é o processo de maquinagem mais utilizado neste tipo de materiais por forma a tornar possível a montagem de diversos componentes. A furação de compósitos é muito exigente do ponto de vista da ferramenta, apresentando estas taxas de desgaste muito elevadas, enquanto que do ponto de vista do material a furação de compósitos pode levar a defeitos tais como delaminação, arrancamento de fibras, rebarbas ou degradação da matriz. Quando combinados com um metal, esta operação apresenta desafios adicionais tais como esforços de corte de magnitude diferente e defeitos na superfície devido à remoção da apar. A furação orbital apresenta-se como uma alternativa à furação convencional, apresentando várias vantagens que resultam numa qualidade superior dos furos obtidos.

Dado o interesse que a indústria automóvel tem mostrado nos compósitos híbridos aço/CFRP e a inexistência de informação acerca da furação desta combinação de materiais, este trabalho visou avaliar a influência dos parâmetros de corte na qualidade dos furos obtidos deste material através do processo de furação orbital, nomeadamente no que à delaminação, rugosidade e precisão dimensional diz respeito. Para tal elaborou-se um plano de ensaios e os resultados foram avaliados. Para verificar a influência dos parâmetros de corte uma análise ANOVA foi realizada, incidindo nos esforços de corte.

No final foi possível concluir que ferramentas recomendadas para maquinagem de CFRPs não funcionam de todo neste tipo de materiais, originando esforços de corte superiores, temperaturas de corte elevadas que levam à degradação da matriz e diâmetros menores, quando comparados com uma ferramenta recomendada para maquinagem de aços. Verificou-se também que para obter esforços de corte menores é aconselhável utilizar avanços por dente superiores, assim como um maior avanço por rotação orbital.

Adicionalmente foi elaborada uma pequena comparação entre a furação orbital e a furação convencional por forma a enaltecer as diferenças dos dois processos na maquinagem neste tipo de materiais.

Palavras-chave: Furação orbital, híbrido CFRP/Aço, precisão dimensional, desgaste da ferramenta

Orbital Drilling of Steel/CFRP Hybrid Composites

Abstract

Composite materials have been reaching an increasing importance in the industry. Their high specific properties and their high flexibility that allows tailoring materials that suit the needs of practically every project have been leading to a growth in the demands of this kind of materials. Fiber-Metal Laminates have an established usage in the aeronautic industry and lately have been subject of research by the automotive industry.

Since composite manufacturing methods allow the production of components with their final geometry, drilling is the most used operation in composites machining. Drilling of composites is very demanding from the tools point of view, with very high wear rates and several defects can occur to the workpiece like delamination, fiber pull-outs, burrs and matrix degradation. When combined with a metal, additional challenges appear in drilling these materials such as loads of different magnitudes during a single operation and surface defects on the interface because of chip removal. Orbital drilling is seen as a promising alternative to conventional drilling, presenting several advantages that result in holes with higher quality.

Given the interest of automotive industry in fiber-metal laminates constituted by steel and carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and due to the lack of information regarding drilling of this combination of materials, the aim of this work is to evaluate the influence of the machining parameters in the quality of holes obtained by orbital drilling. A full factorial design of experiments was done and the results examined. An ANOVA analysis was made in order to verify the influence of the cutting parameters.

It was possible to conclude that tools recommended for machining of CFRPs do not perform well at all when compared to conventional cutting tools recommended for steel, leading to very high cutting forces, higher process temperatures and lower diameters. Also, it was found that in order to have lower cutting forces higher feed rate and helical pitch are advised, for the tested range.

Additionally, a comparison was made between conventional drilling and orbital drilling in order to evaluate the differences on the machining of this kind of materials. The superiority of orbital drilling was observed despite the apparently lower productivity

Keywords: Orbital drilling, steel/CFRP hybrid, dimensional precision, tool wear

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero deixar os maiores agradecimentos aos meus orientadores, Prof. Dr. António Torres Marques, Prof. Dr. Abílio de Jesus e Eng. Santiago Villa por todo o apoio e motivação que me deram no decorrer deste trabalho, assim como pela sua disponibilidade e transmissão de conhecimentos, essenciais para a conclusão desta dissertação. Ao último expresso, também, os maiores agradecimentos pelo seu contributo fundamental na parte experimental do trabalho, dando conselhos valiosos quanto à melhor fixação dos provetes, aos ensaios a realizar, ao tratamento de dados obtidos e dando apoio durante a realização dos mesmos.

Ao Eng. Eduardo Marques agradeço toda a sua disponibilidade, ajuda e supervisão durante a preparação dos materiais.

Ao Professor Bogdan Chiriță, da *Faculty of Engineering, Department of Management and Engineering of Industrial Systems, University of Bacau, Romania*, pelo contributo para a realização do plano de ensaios e análise estatística dos resultados.

Expresso também os maiores agradecimentos à *Palbit, s.a* pelo fornecimento das ferramentas.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito da operação **NORTE-01-0145-FEDER-000022 – SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries**, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



Índice de Conteúdos

Siglas	viii
Lista de Símbolos	ix
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Objetivos do trabalho	1
1.3. Organização da tese	2
2. Materiais Compósitos	3
2.1. Constituintes	6
2.2. Reforços	10
2.3. Matrizes	15
2.4. Compósitos Híbridos	18
3. Processos de Maquinagem	29
3.1. Furação	30
3.2. Furação Orbital	40
4. Trabalho experimental	48
4.1. Compósito Híbrido Aço/CFRP	48
4.2. Ferramentas e Máquina CNC	50
4.3. Aquisição de dados	53
4.4. Fixação da Célula de Carga e dos Provetes	54
4.5. Seleção dos parâmetros de Corte	55
4.6. Plano de Ensaio	58
4.7. Equipamento para análise dos furos realizados	59
5. Discussão dos Resultados	60
5.1. Testes Preliminares	60
5.2. Qualidade dos Furos	67
5.3. Desgaste das ferramentas	74
5.4. Esforços de corte	77
5.5. Análise ANOVA	82
5.6. Furação Orbital vs Furação Convencional	84
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	88
6.1. Conclusões	88
6.2. Trabalhos Futuros	89
Referências	90
Anexo A – Forças Axiais Críticas para Vários Tipos de Broca [72]	97
Anexo B - Ficha Técnica do Aço SSAB Docol 600 DP	98
Anexo C – Ficha Técnica do Pré-Impregnado Usado	99
Anexo D – Ficha Técnica da Resina Epóxido PYROFIL #360/361	100
Anexo E – Ficha Técnica da Resina Epóxido Nanopith ER 150_30	102
Anexo F – Ficha Técnica do Dinamómetro Utilizado	104

Siglas

ARALL	<i>Aramid Reinforced Aluminum Laminate</i>
CARALL	<i>Carbon Reinforced Aluminum Laminate</i>
GLARE	<i>Glass Reinforced Aluminum Laminate</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
FML	<i>Fiber Metal Laminates</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Plastic</i>
HM	<i>High Modulus</i>
HS	<i>High Strength</i>
IM	<i>Intermediate Modulus</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
LM	<i>Low Modulus</i>
PCD	Diamante Policristalino
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
UHM	<i>Ultra High Modulus</i>
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding</i>

Lista de Símbolos

α	Ângulo de Hélice (°)	P_m	Propriedade da matriz
a_p	Avanço axial (mm/rotação orbital)	ν	Coeficiente de Poisson
a_p^*	Avanço axial máximo (mm/rotação orbital)	V_c	Velocidade de corte (m/min)
D	Diâmetro da ferramenta (mm)	v_{fh}	Velocidade de avanço helicoidal (mm/min)
D_{ij}	Rigidez à flexão (GPa)	v_{fha}	Velocidade de avanço axial da hélice (mm/min)
D_d	Diâmetro da zona delaminada (mm)	v_{fht}	Velocidade de avanço tangencial da hélice (mm/min)
D_f	Diâmetro do furo (mm)	v_{ft}	Velocidade tangencial (mm/min)
D_h	Diâmetro da hélice (mm)	z	Número de dentes
E	Módulo de Young (GPa)		
e	Excentricidade (mm)		
f	Avanço por rotação (mm/rot)		
F_c	Força axial crítica (N)		
f_a	Velocidade de avanço axial (mm/min)		
f_r	Velocidade de avanço (mm/min)		
f_{za}	Avanço axial por dente (mm/dente)		
f_{zt}	Avanço tangencial por dente (mm/dente)		
G	Relação entre fresagem e furação		
G_{Ic}	Tenacidade à fratura em Modo I (MPa. \sqrt{m})		
k	Rácio de elipsidade		
M	Rigidez por unidade de largura do material (GPa)		
N	Frequência de rotação (RPM)		
n_0	Frequência de rotação orbital (RPM)		
P_c	Propriedade do compósito a determinar		
P_f	Propriedade das fibras		

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Constituição do Boeing 787 Dreamliner [3].	3
Figura 2.2 – Primeira geração do <i>Chevrolet Corvette</i> [4].	4
Figura 2.3 – a) McLaren MP4/1; b) o seu chassi em CFRP [5].	5
Figura 2.4 – Tipos de reforço em materiais compósitos. Adaptado de [12].	6
Figura 2.5 – Várias formas de reforço: pré-forma [14]; tecido [15]; rolo [16]; pré-impregnado [17]; CSM [13]; CRM [18].	7
Figura 2.6 – Imagem microscópica do betão [20].	7
Figura 2.7 – a) Imagem microscópica de um <i>cermet</i> constituído por Titânio, Tungsténio, Nitrogénio e Cobalto (TiWCN-CO) [21]; b) pastilhas para ferramentas de corte fabricadas com <i>cermets</i> [22].	8
Figura 2.8 – Variação do módulo de elasticidade em função do ângulo de um compósito unidirecional de fibra de carbono com matriz de resina epóxico.	9
Figura 2.9 – Laminado resultante da sobreposição de várias camadas [13].	9
Figura 2.10 – Sea Ray SDX 250. Um barco construído em fibra de vidro [28].	11
Figura 2.11 – Fibras de vidro [29].	11
Figura 2.12 – Esquema do processo de obtenção de fibras de carbono [30].	12
Figura 2.13 – Violino fabricado com fibras de carbono [32].	14
Figura 2.14 – Esquema de obtenção fibras aramídicas [33].	15
Figura 2.15 – Compósitos híbridos intercama, intracama e hibridização de fibras, da esquerda para a direita. Adaptado de [38].	18
Figura 2.16 – Compósitos híbridos de colocação preferencial: a) braço de suspensão e b) portador do diferencial [40, 41].	19
Figura 2.17 – Atenuação da intensidade de tensão na vizinhança da fenda no compósito híbrido ARALL [44].	20
Figura 2.18 – Tipos de <i>Fiber-Metal Laminates</i> . Adaptado de [43].	21
Figura 2.19 – Fabrico de <i>Fiber-Metal Laminates</i> pelo processo de VARTM utilizando placas metálicas perfuradas [45].	23
Figura 2.20 – Área de testes para o empilhamento automatizado dos materiais para fabrico de <i>Fiber-Metal Laminates</i> [47].	23
Figura 2.21 – Propagação de fenda obtida para aço monolítico e compósito híbrido aço/carbono. Adaptado de [55].	24
Figura 2.22 – Tensões residuais resultantes do fabrico de híbridos aço/CFRP através do processo normal, com ciclo de cura modificados e utilizando pressões elevadas (12 bar vs 6 bar recomendados pelo fabricante). Adaptado de [59].	25

Figura 2.23 – Tenacidade à fratura interlaminar dos vários híbridos testados. <i>Curv</i> e <i>Twintex</i> são as denominações comerciais para compósitos de PP reforçados com fibras de vidro e PP reforçado com fibras do mesmo material, respectivamente [62].	26
Figura 2.24 – Curvas carga-deslocamento do compósito de aço/CFRP para várias velocidades de carregamento [62].	26
Figura 2.25 – Curvas Tensão-Deslocamento para compósitos híbridos aço/carbono com tratamentos superficiais de granalhagem (linha descontínua) e promotor de adesão (linha descontínua) [64].	27
Figura 2.26 – Tenacidade à fratura interlaminar em modo I para compósitos de fibra de carbono e híbridos aço/carbono sujeitos a diferentes tratamentos superficiais antes do fabrico [65].	28
Figura 2.27 – Comportamento à fadiga de compósitos de fibra de carbono e híbridos aço/carbono com recurso a pequenas camadas de material polimérico não polar [65].	28
Figura 3.1 – Modelação numérica do processo de furação de um compósito híbrido de carbono e alumínio [67].	29
Figura 3.2 – Broca helicoidal [68].	30
Figura 3.3 – Movimentos da ferramenta na operação de furação [66].	31
Figura 3.4 – Delaminação resultante do processo de furação [69].	32
Figura 3.5 – Fenómenos de delaminação: a) <i>peel-up</i> ; b) <i>push-out</i> . Adaptado de [70].	32
Figura 3.6 – Rebarbas num furo em material compósito [69].	35
Figura 3.7 – Influência da rotação da ferramenta no corte das fibras de um sistema compósito. Adaptado de [74].	35
Figura 3.8 – Superfície maquinada de um compósito de carbono unidirecional. Adaptado de [75]. Nota: a medição do ângulo foi realizada de maneira diferente. De acordo com a Figura 3.7 estes valores correspondem ao intervalo 90-180°.	35
Figura 3.9 – Microscopia eletrónica da superfície maquinada de um compósito de carbono na zona com ângulo de 40° entre as fibras e a aresta de corte. Adaptado de [75]. Nota: a medição do ângulo foi realizada de maneira diferente. De acordo com a Figura 3.7 este valor é equivalente a 140°.	36
Figura 3.10 – Perfil da superfície de um furo de material compósito [74].	36
Figura 3.11 – Ferramentas em branco (<i>tool blanks</i>) fabricadas em PCD [76].	37
Figura 3.12 – Fases durante a operação de furação com broca de dentes direitos [78].	37
Figura 3.13 – Evolução dos esforços atuantes na ferramenta durante a furação de um FML CFRP/alumínio [79].	38
Figura 3.14 – Desgaste de uma broca revestida com PCD na furação de FMLs de alumínio, carbono e titânio [84].	39
Figura 3.15 – Broca para furação de FMLs [87].	40
Figura 3.16 – Percurso da ferramenta na furação orbital [88].	40
Figura 3.17 – Fresas de topo plano para compósitos [89].	40

Figura 3.18 – Esforço na camada exterior do material para: (a) furação convencional e (b) furação orbital [90].	41
Figura 3.19 – a) Representação esquemática dos vórtices de Taylor entre a ferramenta e a peça; b) vórtices de Taylor durante a furação orbital.	42
Figura 3.20 – Esquema para a determinação de velocidade tangencial da hélice [91].	44
Figura 3.21 – Esquema para a determinação do avanço axial [91].	44
Figura 3.22 – Efeito da excentricidade da ferramenta na furação orbital [80].	45
Figura 3.23 – Aparas resultantes de cada tipo de movimento [100].	46
Figura 3.24 – Geometria da apara não deformada [91].	47
Figura 3.25 – Evolução da apara com a rotação da ferramenta [91].	47
Figura 3.26 – Aparas resultantes da furação orbital de titânio. Adaptado de [91].	47
Figura 3.27 – Aparas resultantes da maquinagem de CFRP [102].	47
Figura 4.1 – Granalhadora DE LAURENTIIS 70S GM.	49
Figura 4.2 – Prensa hidráulica de pratos quentes INTOCO®.	50
Figura 4.3 – Compósito híbrido utilizado e marcado para a furação.	50
Figura 4.4 – Fresa para maquinagem de CFRP (fornecida pela <i>Palbit</i> , s.a).	51
Figura 4.5 – Fresa para maquinagem de aço (fornecida pela <i>Palbit</i> , s.a).	51
Figura 4.6 – Ferramenta recomendada para maquinagem de aço utilizada nos testes preliminares (fornecida pela <i>Palbit</i> , s.a).	51
Figura 4.7 – Broca de dentes retos (fornecida pela <i>Palbit</i> , s.a).	52
Figura 4.8 – DMU 60 eVo DECKEL MAHO [105].	52
Figura 4.9 – Pinças de fixação do tipo ER.	52
Figura 4.10 – a) célula de carga KISTLER 9272; b) amplificador KISTLER 5070A; c) carta de aquisição de dados <i>Advantech</i> USB-4711 ^a .	53
Figura 4.11 – a) peças elaboradoras, em liga de alumínio para a fixação dos provetes; b) montagem na célula de carga.	54
Figura 4.12 – Placas de fixação na célula de carga.	54
Figura 4.13 – Micrómetro de interiores.	59
Figura 4.14 – Microscópio <i>Olympus</i> SZH.	59
Figura 5.1 – Faíscas durante a furação do provete.	60
Figura 5.2 – Entrada do furo (zona de CFRP): a) furo realizado com ferramenta para aço; b) furo realizado com a ferramenta para CFRP.	61
Figura 5.3 – Saída do furo (zona de aço): a) furo realizado com a ferramenta para aço; b) furo realizado com a ferramenta para CFRP.	61

Figura 5.4 – Entrada do furo (zona de aço): a) furo realizado com a ferramenta para CFRP; b) furo realizado com a ferramenta para aço.	62
Figura 5.5 – Delaminação após furação com a ordem aço/CFRP (ensaio 5).	62
Figura 5.6 – Furo resultante da maquinagem com ordem inversa com ferramenta para CFRP (ensaio 3): a) saída do furo (zona de CFRP) e b) fibras soltas.	62
Figura 5.7 – a) ferramenta para CFRP nova e b) a mesma ferramenta após 3 furos.	63
Figura 5.8 – a) ferramenta para aço nova b) mesma ferramenta após 2 furos.	63
Figura 5.9 – Comparação das ferramentas de corte após os ensaios: a) ferramenta para CFRP e b) ferramenta para aço.	64
Figura 5.10 – Esforço axial (ensaio 1).	64
Figura 5.11 – Esforço axial (ensaio 4).	65
Figura 5.12 – Esforços de corte no plano (ensaio 2).	65
Figura 5.13 – Esforços de corte no plano (ensaio 4).	66
Figura 5.14 – Esforços de corte com ordens de furação contrárias: CFRP/aço (esquerda, ensaio 4) e aço/CFRP (direita, ensaio 5).	66
Figura 5.15 – Diâmetro médio dos furos obtidos em cada ensaio.	68
Figura 5.16 – Entrada do furo (repetição 3, ensaio 3) com de menor qualidade (ferramenta para CFRP).	69
Figura 5.17 – Entrada no furo (repetição 3, ensaio 7) realizado após o da figura anterior (ferramenta CFRP).	69
Figura 5.18 – Sobreaquecimento na zona de aço maquinada com a ferramenta para CFRP (repetição 3, ensaio 3).	70
Figura 5.19 – Dano de aquecimento mais severo na zona de aço, quando maquinada com a ferramenta para aço (repetição 2, ensaio 4).	70
Figura 5.20 – Dano devido ao sobreaquecimento mais comum na zona de aço (ferramenta para aço)	71
Figura 5.21 – Aresta de corte da fresa para CFRP após os ensaios.	74
Figura 5.22 – Ferramentas de aço usadas: A3 (esquerda) e A1 (direita).	74
Figura 5.23 – Esforço de corte (repetição 3, ensaio 5) com patamar definido (CFRP) e evolução transiente do esforço axial (aço).	77
Figura 5.24 – Esforço de corte (repetição 3, ensaio 8) com dois patamares positivos.	77
Figura 5.25 – Esforço de corte (repetição 3, ensaio 1) com dois patamares bem definidos. ...	78
Figura 5.26 – Comparação do esforço axial máximo absoluto.	78
Figura 5.27 – Esforço axial na maquinagem do CFRP.	79
Figura 5.28 – Esforços de corte (repetição 1, ensaio 1) durante o primeiro furo de uma matriz de ensaios (ferramenta para aço).	80

Figura 5.29 – Esforços de corte (repetição 1, ensaio 8) durante o primeiro furo de uma matriz de ensaios (ferramenta para aço).	80
Figura 5.30 – Esforço no plano durante a furação orbital com a ferramenta para aço (repetição 1, ensaio 8).....	81
Figura 5.31 – Esforço máximo no plano.	81
Figura 5.32 – Influência do avanço por dente no esforço axial.....	83
Figura 5.33 – Influência do <i>pitch</i> no esforço axial.	84
Figura 5.34 – Interação entre o avanço por dente e o avanço por rotação orbital.	84
Figura 5.35 – Broca de dentes retos: a) nova; b) após o furo e c) vista aproximada das arestas de corte.	85
Figura 5.36 – Furo realizado com a broca (furação convencional): a) entrada do furo e b) saída do furo.	85
Figura 5.37 – Entrada do furo (CFRP) pelo processo de: a) furação convencional e b) furação orbital.....	86
Figura 5.38 – Saída do furo pelo processo de: a) furação convencional e b) furação orbital. .	86
Figura 5.39 – Esforço axial durante a furação convencional.	87
Figura 5.40 – Binário durante a furação convencional.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades de vários tipos de fibra de vidro. Adaptado de [13].	11
Tabela 2.2 – Propriedades de vários tipos de fibras de carbono. Adaptado de [30].	13
Tabela 2.3 – Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas. Adaptado de [33].	15
Tabela 2.4 – Propriedades de várias resinas termoendurecíveis [13].	16
Tabela 2.5 – Propriedades de várias resinas termoplásticas. Adaptado de [13].	17
Tabela 2.6 – Vantagens dos <i>Fiber-Metal Laminates</i> [43].	20
Tabela 3.1 – Principais processos de maquinagem [66].	29
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas e composição química (mássica) do aço Docol 600DP.	48
Tabela 4.2 – Dimensões das fresas utilizadas.	51
Tabela 4.3 – Características da máquina CNC DMU 60 eVo DECKEL MAHO. Adaptado de [105].	53
Tabela 4.4 – Parâmetros de gerais corte recomendados por vários fabricantes para a fresagem de CFRP e aço de elevada resistência.	55
Tabela 4.5 - Parâmetros de corte utilizados em várias investigações de furação orbital de CFRP e híbridos com este material.	56
Tabela 4.6 – Parâmetros de corte utilizados em várias investigações na fresagem de CFRP.	56
Tabela 4.7 – Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante.	56
Tabela 4.8 – Parâmetros de corte selecionados.	57
Tabela 4.9 – Parâmetros de corte na furação de CFRP em várias investigações.	57
Tabela 4.10 – Matriz de Ensaios.	58
Tabela 4.11 – Ordem de execução dos ensaios.	58
Tabela 5.1 – Parâmetros dos ensaios preliminares.	60
Tabela 5.2 – Diâmetro dos furos realizados nos testes preliminares.	67
Tabela 5.3 – Nomenclatura das ferramentas utilizadas.	67
Tabela 5.4 – Furos que sofreram sobreaquecimento.	70
Tabela 5.5 – Evolução do aspeto da entrada dos furos ao longo da matriz de ensaios.	72
Tabela 5.6 – Evolução do aspeto da saída dos furos ao longo da matriz de ensaios.	73
Tabela 5.7 – Fresa para maquinar aço antes e após os ensaios.	75
Tabela 5.8 – Fresa para maquinar CFRP antes e após os ensaios.	76
Tabela 5.9 – Resultados da análise ANOVA para o esforço axial.	82

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

A presente dissertação foi realizada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), na especialização de Projeto e Construção Mecânica.

O presente trabalho, de nome “Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP” foi realizado no âmbito do projeto *SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries* e incidiu no estudo da furação orbital de compósitos híbridos constituídos por aço e polímero reforçado com fibras de carbono. A furação orbital é um processo alternativo de furação direta que tem vindo a obter cada vez mais atenção quando se trata de maquinar compósitos, especialmente na indústria aeronáutica. Entre as principais vantagens estão o menor risco de delaminação, melhor acabamento e possibilidade de realizar furos com vários diâmetros com uma só ferramenta. Na indústria aeronáutica o uso de compósitos compostos por camadas de metal e plástico reforçado com fibras é já habitual, utilizando metais como o alumínio ou titânio. Contudo, a indústria automóvel tem recentemente investigado materiais deste género utilizando o aço. Devido à escassa informação existente acerca da maquinaria desta combinação de materiais e ao interesse que estes têm levantado procurou-se estudar a aplicação do processo de furação orbital, com os benefícios que acarreta, e verificar a qualidade dos furos obtidos.

1.2. Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo da furação orbital de compósitos híbridos de aço com polímeros reforçados com fibra de carbono. O interesse nesta combinação de materiais tem sido alvo de maior atenção por parte da indústria automóvel. Contudo, a informação acerca da maquinaria desta combinação é escassa. Por este motivo, o trabalho visa a realização de um programa experimental focado na utilização de diversos parâmetros de corte para a realização de furos para, no final, avaliar a qualidade final dos mesmos.

1.3. Organização da tese

O documento está organizado de acordo com uma sucessão lógica de eventos, enquadrando o leitor com o paradigma atual dos temas abordados, incluindo após uma revisão bibliográfica o programa experimental realizado, os resultados obtidos e respectivas análises para que o mesmo possa, também, observá-los com espírito crítico.

Assim, no Capítulo 1 é realizada uma introdução ao trabalho, a sua motivação e os objetivos que se pretenderam atingir com a sua realização.

Os Capítulos 2 e 3 consistem numa revisão bibliográfica onde no Capítulo 2 é realizada uma apresentação dos materiais compósitos, com ênfase nos compósitos híbridos e abordando mais detalhadamente os compósitos híbridos aço/compósito enquanto que no Capítulo 3 é abordado o tema da furação de compósitos, com particular destaque para polímeros reforçados com fibra de carbono e híbridos com este material.

No Capítulo 4 é descrito em detalhe todo o procedimento experimental. É neste capítulo que são descritos os equipamentos, materiais e ferramentas utilizados, a seleção dos parâmetros maquinagem e a criação do plano de ensaios.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e realizada a análise e discussão dos mesmos.

No final, o Capítulo 6 contém as conclusões retiradas a partir das análises do capítulo anterior e são propostos trabalhos futuros que possam adicionar conteúdo relevante a este tema.

2. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos resultam de uma combinação de dois ou mais materiais com características diferentes que, quando combinados, resultam num produto com propriedades superiores a qualquer dos materiais utilizados individualmente. Segundo Strong [1], um material compósito pode ser descrito da seguinte maneira:

“Materiais compósitos são materiais sólidos constituídos por um aglomerador, ou matriz, que rodeia e mantém em lugar os reforços.”

As primeiras utilizações deste tipo de materiais datam dos tempos antigos (a.C), onde uma combinação de lama e palha era utilizada para fabricar tijolos reforçados para a construção de casas. Por volta do séc. XIII, o povo Mongol inventou o primeiro arco feito de material compósito. Estes eram feitos recorrendo a madeira, bambu e tendões de gado, que funcionariam como reforço, e eram aglomerados através de resina natural obtida de pinheiros. Durante cerca de dois séculos este arco foi das armas mais temidas no planeta, sendo apenas suplantada pelo aparecimento de armas de fogo [2].

Atualmente, a utilização de materiais compósitos tem assumido uma importância cada vez maior. As suas propriedades específicas elevadas combinadas com um peso específico inferior têm suscitado um interesse crescente na utilização destes materiais. Outra vantagem incide na existência de, praticamente, infinitas combinações de materiais que permitem a utilização, ou criação, de materiais compósitos de acordo com cada aplicação.

As indústrias aeronáutica, automóvel e das energias têm sido as maiores impulsionadoras dos materiais compósitos e têm-se focado no desenvolvimento destes, com o objetivo de obter as melhores propriedades com o menor peso possível por forma a reduzir os custos energéticos e reduzir a emissão de poluentes para atmosfera nos dois primeiros casos. O Boeing 787 Dreamliner possui 50% do seu peso em materiais compósitos [3], a maior parte dos quais sendo compósitos de fibras de carbono (ver Figura 2.1).

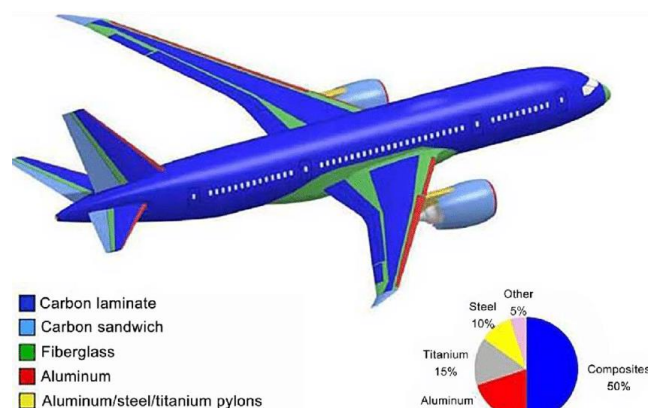


Figura 2.1 – Constituição do Boeing 787 Dreamliner [3].

No que concerne à indústria automóvel, a busca incessante por automóveis com desempenhos superiores aliados às exigências ambientais elevadas fazem desta uma área onde a utilização de materiais compósitos tem crescido cada vez mais. Contudo a utilização destes materiais não é exclusiva dos tempos atuais. Na década de 50, a *General Motors* aliou-se à *Owens Corning*, empresa especializada em fibras de vidro, e criaram o primeiro automóvel com carroçaria completamente fabricada em compósitos reforçados com esse material. O automóvel em questão foi a primeira geração do *Chevrolet Corvette*, Figura 2.2, atualmente um ícone do automobilismo mundial.



Figura 2.2 – Primeira geração do *Chevrolet Corvette* [4].

Em 1981 a McLaren apresentou o primeiro Fórmula 1 com o chassis completamente construído em fibra de carbono: o McLaren MP4/1, Figura 2.3. Durante a transição da década de 70 para 80 o foco de todas as equipas estava centrado no chamado *efeito solo*, que permitia a obtenção de grandes vantagens aerodinâmicas com o aproveitamento do escoamento de ar que passava debaixo do carro. Com o intuito de otimizar este efeito, John Barnard, designer principal do projeto, viu no compósito de fibra de carbono o material ideal para atingir tal objetivo. O resultado foi uma secção do chassis reduzida, e uma rigidez torsional mais elevada do que se obteria utilizando outros materiais, como o alumínio [5]. Embora sendo um carro muito inovador, o McLaren MP4/1 não obteve grande sucesso. No entanto, a utilização de fibra de carbono foi de tal forma inovadora que não tardou até que os adversários comesçassem a adotar este material. Com o estabelecimento deste material na competição foi uma questão de tempo até se observarem aplicações em automóveis de estrada. O Ferrari F40 e o McLaren F1 são exemplos de supercarros que recorreram a compósitos de fibra de carbono e *Kevlar*®. Atualmente, qualquer superdesportivo utiliza materiais desta natureza. No que concerne aos automóveis do dia a dia o fabrico destes caminha também para a utilização destes materiais. A geração atual do BMW Série 7 utiliza componentes estruturais constituídos por uma combinação de fibras de carbono, aço de elevada resistência e alumínio ao qual a marca denomina “*Carbon Core*”[6]. Outros exemplos são a célula dos passageiros do BMW i3 e um painel traseiro do Audi A8, ambos em compósito de fibra de carbono, e no último caso com um contributo de 33% na rigidez torsional total do veículo [7].



Figura 2.3 – a) McLaren MP4/1; b) o seu chassi em CFRP [5].

No que toca ao segmento das energias, a utilização de compósitos foi impulsionada pelo crescimento da utilização de energias renováveis, em particular a energia eólica. Em 2015, a energia elétrica total obtida através de turbinas eólicas rondou os 435 gigawatts (GW). Estima-se que em 2030 este valor possa subir para 2110 GW, o que corresponderá a 20% da energia total produzida mundialmente [8]. O reduzido peso-específico diminui a força gravítica quando uma pá se encontra na posição horizontal, diminuindo também os efeitos de flexão causados por esta. A elevada rigidez assegura que o desempenho aerodinâmico seja o ideal e o bom desempenho à fadiga assegura uma vida longa para a turbina [9]. Com a evolução destas propriedades será possível a utilização de pás com comprimento superior a girar com uma velocidade de rotação maior, o que permitirá a geração de uma quantidade muito superior de energia elétrica.

Para além das vantagens em termos de desempenho estrutural, os materiais compósitos também permitem a obtenção de soluções ambientalmente amigáveis. A utilização de fibras naturais tem crescido ao longo dos últimos anos, sendo utilizadas em aplicações não estruturais, substituindo as fibras de vidro. Maadeed e Labidi [10] estudaram, inclusive, a hipótese de utilizar uma combinação de fibras naturais com plástico reciclado. Exemplos da sua utilização são os painéis interiores de vários automóveis, raquetes de ténis, quadros de bicicletas e móveis [11].

No final desta secção fica evidente o motivo da crescente utilização destes materiais. As suas vantagens, a sua versatilidade, a tendência natural de evolução dos processos tecnológicos para a sua obtenção, assim como o aumento de informação acerca dos materiais compósitos, enaltecera as vantagens atualmente já bastante interessantes e procuradas e permitirá, possivelmente, colmatar algumas das desvantagens pelo que o seu futuro não poderia ser mais excitante.

2.1. Constituintes

Na grande maioria dos casos, um sistema compósito é um material bifásico constituído por um reforço (fase dispersa) embebido numa matriz (fase contínua). Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com vários critérios, mas são geralmente distinguidos tendo em conta a matriz utilizada, sendo designados por:

- Compósitos de Matriz Polimérica
- Compósitos de Matriz Metálica
- Compósitos de Matriz Cerâmica

Quanto aos reforços, estes são utilizados sobre a forma de partículas ou fibras, Figura 2.4, sendo as primeiras as mais utilizadas na indústria.

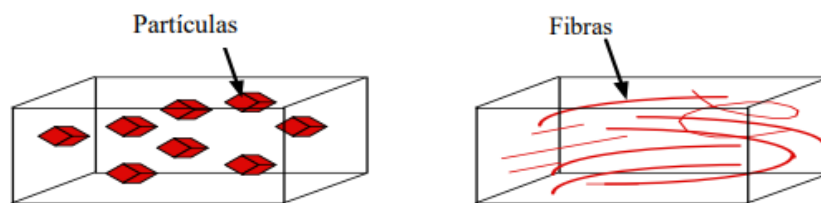


Figura 2.4 – Tipos de reforço em materiais compósitos. Adaptado de [12].

As fibras de um material apresentam geralmente propriedades muito superiores à do mesmo material num estado aglomerado com volume superior. Os motivos deste fenómeno residem no facto de as fibras possuírem uma estrutura molecular muito mais organizada (os seus cristais estão alinhados ao longo do eixo da fibra) e à menor existência de defeitos internos. Estas podem ser longas ou curtas, alinhadas ou dispostas aleatoriamente na matriz. As fibras podem ser adquiridas sob a forma de rolos (*rovings*), mantas (*mats*), tecidos (*wovens*), inseridas em pré-impregnados ou compostos de moldação e pré-formas.

Os rolos não são mais que cordões de filamentos enrolados helicoidalmente em bobines. Nas mantas as fibras são distribuídas aleatoriamente e aglomeradas com um ligante especial solúvel na solução. As mantas podem ser de filamentos cortados (*Chopped Strand Mat - CSM*), filamentos contínuos (*Continuous Random Mat - CRM*) ou mantas de superfície. Os tecidos são obtidos entrelaçando fibras longas e podem ser bidimensionais ou tridimensionais, com os últimos a beneficiar de uma resistência interlaminar superior. Os pré-impregnados são fibras pré-impregnadas na resina e podem vir na forma de tecido, manta ou rolo. Os pré-impregnados evitam a necessidade de adição de resina, bastando empilhar as várias camadas e curar para obter o produto final. As pré-formas oferecem uma boa relação resistência-peso e consistem na utilização de várias camadas de reforço para conformar formas próximas da final. Estas formas são depois colocadas no molde onde posteriormente se injetará a resina [13].

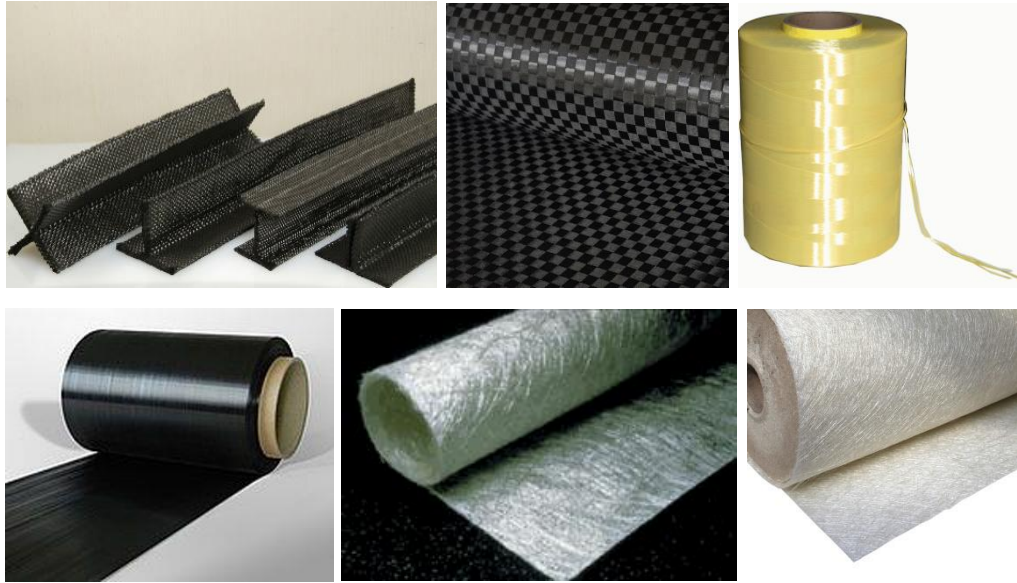


Figura 2.5 – Vários formas de reforço: pré-forma [14]; tecido [15]; rolo [16]; pré-impregnado [17]; CSM [13]; CRM [18].

A utilização de partículas como reforço representa um meio menos eficaz de reforço quando comparado com as fibras, mas mais barato. Este tipo de reforços subdivide-se em duas categorias [19]:

- Compósitos com partículas de grandes dimensões, que atuam restringindo o movimento da matriz.
- Compósitos reforçados por dispersão, que contêm partículas numa escala nanométrica dispersas na matriz. Este é um caso excecional em que a matriz é responsável por suportar a maior parte da carga, enquanto que o reforço limita a sua deformação plástica.

O compósito reforçado com partículas mais conhecido é o betão, que consiste numa combinação de cimento com partículas de areia e gravilha, Figura 2.6. Neste caso, o cimento funciona como matriz e aglomera o reforço constituído pelas partículas de areia e gravilha. O betão pode ainda ser combinado com um reforço de aço por forma a criar betão armado, que apresenta propriedades à tração superiores quando comparado com o betão a solo.

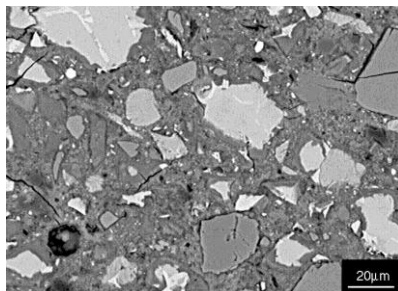


Figura 2.6 – Imagem microscópica do betão [20].

Os *cermets* são compósitos de partículas cerâmicas embebidas numa matriz metálica que aumenta a tenacidade do material resultante. Exemplos de *cermets* são o Carboneto de Tungstênio (WC) e o Carboneto de Titânio (TiC), amplamente utilizados no fabrico de ferramentas de corte para operações de maquinagem, Figura 2.7.

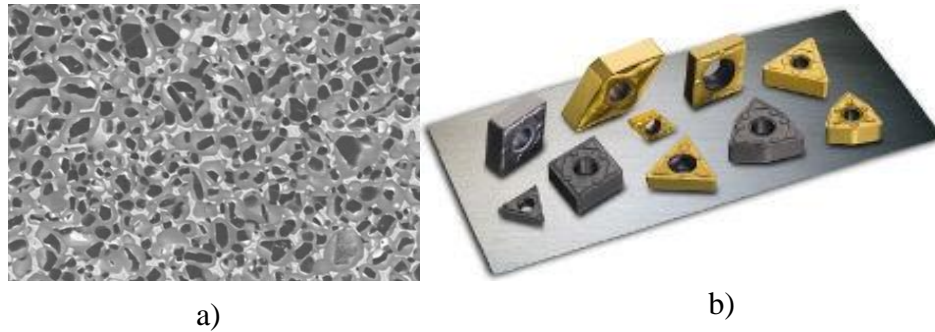


Figura 2.7 – a) Imagem microscópica de um *cermet* constituído por Titânio, Tungstênio, Nitrogénio e Cobalto (TiWCN-CO) [21]; b) pastilhas para ferramentas de corte fabricadas com *cermets* [22].

Quanto ao reforço na forma de fibras, estas são muito utilizadas com matrizes poliméricas, dando origem à denominação de Plásticos Reforçados com Fibras (em Inglês *FRP – Fiber Reinforced Plastics*) embora existam também metais reforçados da mesma maneira. Os FRP têm uma utilização muito dispersa, dependendo do tipo de fibra utilizada, sendo utilizadas em grande quantidade na indústria aeronáutica e automóvel. Parte da fuselagem de foguetões é fabricada com compósitos de matriz metálica de alumínio reforçada com fibras de boro [23]. Outros exemplos de compósitos de matriz metálica são discos de travão, pistões, cilindros e placas para veículos blindados [24] [25].

Dos três grupos mencionados acima, os compósitos com matrizes poliméricas são os mais utilizados pois são mais fáceis de moldar, mais leves, mais baratos e os que mais facilmente impregnam o reforço. Por outro lado, apresentam má estabilidade térmica, baixa rigidez e baixa dureza. Por isso quando algum destes requisitos é desejado, a utilização de matrizes poliméricas é posta de lado, recorrendo-se a matrizes metálicas ou cerâmicas. Cada um dos três tipos de compósitos mencionados acima pode ser considerado um tema por si só, apresentando características e detalhes muito diferentes que, se descritos detalhadamente no presente trabalho o tornariam demasiado extenso. Por este motivo, o foco irá centrar-se nos compósitos de matriz polimérica, os de interesse para o trabalho realizado. Em relação a estes, a obtenção da geometria final do produto é conseguida através da sobreposição de várias camadas reforçadas com fibras. A não homogeneidade do material resulta em propriedades dependentes com a direção, como é exemplo a Figura 2.8, ou seja, são materiais anisotrópicos. A anisotropia pode ser “combatida” utilizando uma sequência de empilhamento adequada, mas ao mesmo tempo é esta característica que permite a obtenção de propriedades de acordo com as necessidades de cada projeto, não sendo completamente uma desvantagem neste domínio. Ao produto resultante deste empilhamento dá-se o nome de *laminado*, Figura 2.9.

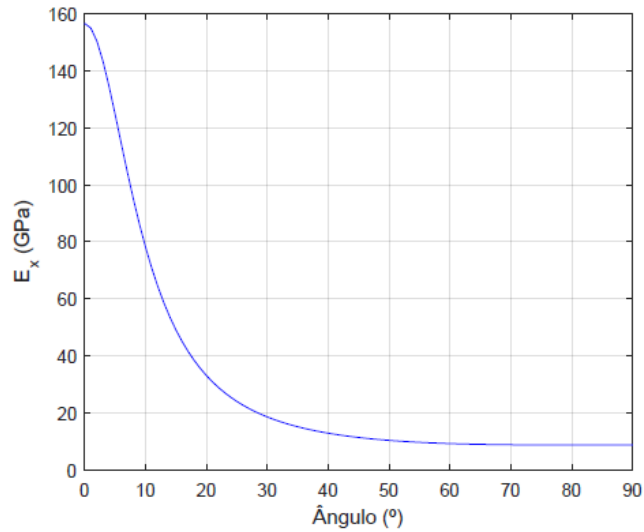


Figura 2.8 – Variação do módulo de elasticidade em função do ângulo de um compósito unidirecional de fibra de carbono com matriz de resina epóxido.

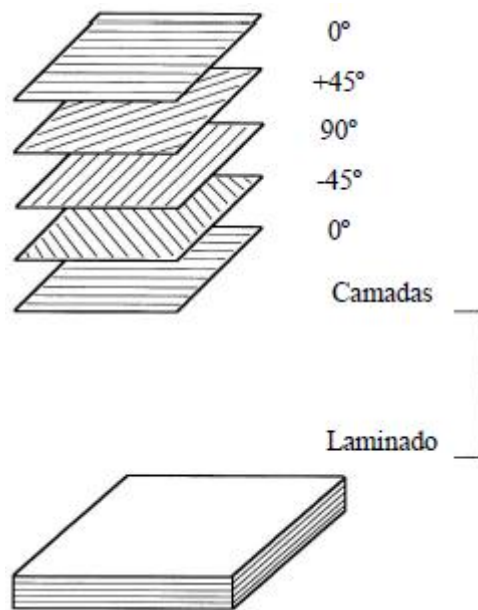


Figura 2.9 – Laminado resultante da sobreposição de várias camadas [13].

Tratando-se de uma combinação de materiais, as propriedades do compósito serão função da percentagem existente de cada um assim como da afinidade entre a matriz e o reforço (*Interface*). O método mais direto de se prever as propriedades mecânicas do compósito é utilizando a regra das misturas que tem a forma apresentada pelas expressões (2.1) e (2.2) [13]:

$$P_c = P_r V_r + P_m V_m \quad (2.1)$$

$$P_c = \frac{P_r P_m}{P_r V_m + P_m V_r} \quad (2.2)$$

Em que:

P_c – Propriedade de interesse a determinar do compósito

P_r - Propriedade de interesse do reforço

P_m - Propriedade de interesse da matriz

V_r – Fração volumétrica do reforço

V_m – Fração volumétrica da matriz

A expressão (1) permite obter uma estimativa das propriedades do compósito na sua direção principal enquanto que a expressão (2) fornece estimativas das propriedades na direção perpendicular a este. Contudo, estas estimativas são algo grosseiras, fruto das simplificações realizadas na sua dedução pelo que é sempre aconselhável realizar ensaios para uma determinação mais precisa. Outros métodos para determinação das propriedades foram propostos por Halpin/Tsai e Puck, mas devido à utilização de variáveis que necessitam de ser determinadas empiricamente estas têm uma utilização menos estabelecida [26].

2.2. Reforços

Os reforços são os principais responsáveis pelas propriedades mecânicas do compósito, sendo esta a fase responsável por suportar as cargas do projeto. Nos pontos seguintes serão descritas com algum detalhe as fibras de vidro, carbono e aramídicas devido à sua maior utilização quando comparadas com outras fibras. Exemplos de outros tipos são as fibras naturais, de boro, poliamidas e poliésteres.

2.2.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro são as fibras mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos. Exemplos da sua aplicação são a construção de painéis para automóveis, barcos (Figura 2.10) e acessórios desportivos como arcos, pranchas de surf e skates [27]. As vantagens na sua utilização quando comparados com outros materiais como a madeira ou metais são o seu peso mais baixo, a inexistência de corrosão, a facilidade em obter formas complexas e o menor custo de fabrico. São produzidas por estiramento de vidro fundido (temperatura de fusão de 1260 °C) através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas. Usualmente, as fibras depois de estiradas são revestidas para evitar a danificação desta (revestimento têxtil) e para permitir a compatibilização da fibra com a matriz (revestimento plástico). O revestimento deve também impedir o contacto das fibras com a humidade devido à higroscopia desta [13].



Figura 2.10 – Sea Ray SDX 250. Um barco construído em fibra de vidro [28].

Existem vários tipos de fibras de vidro, mas para a obtenção de compósitos salientam-se as fibras dos tipos E, S e R. As fibras do tipo E apresentam boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas e são as mais utilizadas devido ao seu custo reduzido. As fibras dos tipos S e R são produzidas a partir de vidros de alta resistência e muitos utilizados na indústria aeronáutica. Estas têm rigidez cerca de 35% superior e melhor retenção de propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, quando comparadas com as fibras do tipo E [13]. Fibras de vidro podem ser observadas na Figura 2.11 enquanto que a Tabela 2.1 apresenta propriedades de alguns tipos de fibra de vidro.



Figura 2.11 – Fibras de vidro [29].

Tabela 2.1 – Propriedades de vários tipos de fibra de vidro. Adaptado de [13].

	<i>Vidro E</i>	<i>Vidro S</i>	<i>Vidro R</i>
<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	2,6	2,49	2,55
<i>Módulo de Young (GPa)</i>	73	85,5	86
<i>Tensão de Rotura (MPa)</i>	3400	4580	4400
<i>Extensão após rotura (%)</i>	4,4	5,3	5,2
<i>Coeficiente de expansão térmica (10⁻⁶/C)</i>	5,0	2,9	4,0

2.2.2. Fibras de carbono

O material de engenharia ideal teria rigidez elevada, resistência elevada, tenacidade elevada e baixo peso. As fibras de carbono, combinadas com uma matriz tenaz, aproximam-se desse material ideal. Fibras de carbono são fibras com propriedades de excelência, tanto mecânicas como térmicas e químicas.

Uma descrição detalhada das fibras de carbono é apresentada por Strong [30], onde aborda o fabrico, as propriedades e algumas aplicações. A produção de fibras de carbono consiste na decomposição térmica de vários precursores orgânicos. Os três principais precursores são: celulose (*rayon*), poliácritonitrilo (PAN) e o alcatrão (*pitch*). O primeiro é pouco utilizado devido às elevadas temperaturas necessárias na grafitação, fazendo com que seja muito dispendioso. A obtenção de fibras de carbono através dos outros dois precursores é similar, embora resulte em fibras com propriedades diferentes. Fibras baseadas no PAN apresentam boas propriedades com custos relativamente baixos enquanto que as fibras baseadas no *pitch* apresentam módulo de elasticidade elevados e boa condutividade térmica. A obtenção das fibras com recurso a estes precursores é esquematizada na Figura 2.12:

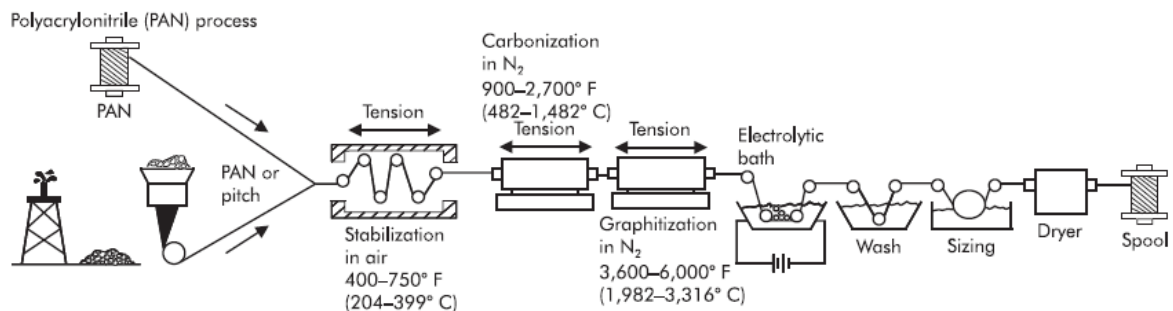


Figura 2.12 – Esquema do processo de obtenção de fibras de carbono [30].

Inicialmente as fibras são estabilizadas através da criação de ligações moleculares reticulares para que estas não fundam nas fases seguintes. Estas ligações são conseguidas aquecendo as fibras até 300 °C numa atmosfera rica em oxigénio. A esta fase dá-se o nome de estabilização ou oxidação. No passo seguinte, denominado de carbonização, as fibras são aquecidas até temperaturas superiores às de oxidação numa atmosfera rica em nitrogénio. O objetivo deste passo é o de remover qualquer elemento que esteja ligado aos átomos de carbono por forma a que apenas carbono esteja presente no final. No final desta fase, o conteúdo em carbono encontra-se entre os 80% e 95%. Para obter os valores finais de rigidez e resistência as fibras são sujeitas ao processo de grafitação. Neste processo a estrutura molecular das fibras é consolidada, obtendo-se propriedades mecânicas superiores e conteúdo de carbono a rondar os 99%. As fibras são, então, tratadas superficialmente através de um banho de eletrólitos que removem detritos que possam existir e melhoram os níveis de adesão entra as fibras e as várias matrizes possíveis.

As fibras de carbono estão disponíveis numa variedade de graus que normalmente são agrupados de acordo com o módulo de elasticidade. Assim existem os seguintes grupos:

- Fibras de Módulo Ultra Elevado (*Ultra High Modulus – UHM*)
- Fibras de Módulo Elevado (*High Modulus – HM*)
- Fibras de Módulo Intermédio (*Intermediate Modulus – IM*)
- Fibras de Baixo Módulo (*Low Modulus - LM*)
- Fibras de Alta Resistência (*High Strength - HS*)

Algumas propriedades destas fibras são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades de vários tipos de fibras de carbono. Adaptado de [30].

	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>	<i>Extensão após ruptura (%)</i>
PAN			
<i>LM</i>	3450 – 4500	228 - 234	1,6 – 1,8
<i>IM</i>	5400 – 6400	275 - 300	2.1
<i>UHM</i>	3500 - 4400	441 - 586	0,5 - 1
Pitch			
<i>SM</i>	1900	379	0,5
<i>IM</i>	2100	517	0,4
<i>UHM</i>	3600	724 - 883	0,4
Rayon			
	758 - 821	35 - 42	-

Os compósitos de fibra de carbono são aplicados em projetos com exigências elevadas e, por isso, o uso de materiais com este reforço acontece em larga escala na indústria aeronáutica (e.g. fuselagem, asas, estabilizador) e na competição automóvel (e.g. Figura 2.3). Para além das propriedades mecânicas de excelência as fibras de carbono possuem boa condutividade térmica, coeficiente de expansão negativo, são quimicamente inertes exceto em raras situações, possuem boas características de amortecimento e são bons condutores elétricos. Aplicações interessantes destas características são no fabrico de instrumentos musicais, Figura 2.13, devido à rigidez elevada e ao bom amortecimento, e no uso de escudos contra interferências nas ondas de rádio devido às suas propriedades elétricas.

Embora apresentem um grande leque de vantagens, as fibras de carbono possuem também algumas desvantagens. Os compósitos com fibras de carbono são frágeis, têm pouca resistência ao impacto, a extensão de ruptura é baixa, têm baixa resistência à compressão e custo muito elevado (cerca de 10 a 20 vezes superior ao preço da fibra de vidro). Contudo, a crescente

procura deste material tem motivado a pesquisa de métodos de fabrico de baixo-custo destas fibras. Métodos de reciclagem têm sido, também, alvo de pesquisa recente, com o objetivo de obter fibras a um custo menor e com menor impacto ambiental [31].



Figura 2.13 – Violino fabricado com fibras de carbono [32].

2.2.3. Fibras Aramídicas

Desenvolvidas pela *DuPont*, e mais conhecidas por *Kevlar*[®], as fibras aramídicas são as fibras orgânicas mais utilizadas como reforço. Estas são fabricadas a partir de poliamidas. Quando o polímero é formado este é filtrado, lavado e secado. De seguida, é dissolvido num banho quente de ácido sulfúrico e extrudido através de uma placa com pequenos orifícios que originam as fibras. Posteriormente são cortadas, secadas e enroladas, ficando prontas para a comercialização [33]. Uma esquematização deste processo pode ser vista na Figura 2.14.

Em termos de propriedades estas apresentam uma tensão de rotura comparável às fibras de carbono enquanto que o módulo de elasticidade se encontra entre as fibras de carbono e as fibras de vidro. As fibras aramídicas apresentam extensões após rutura relativamente elevadas que aliadas às elevadas tensões de rotura lhes conferem uma tenacidade muito alta. A tenacidade elevada é precisamente o fator mais importante destas fibras, que justifica a sua elevada utilização na área da balística. Compósitos reforçados com fibras aramídicas são utilizados para a criação de coletes à prova de bala e utilizados como armadura em veículos de combate. Fora desta área, estas fibras são utilizadas nas arestas de ataque das asas dos aviões e outros locais onde seja provável a ocorrência de impactos. Os reservatórios de alta pressão recorrem também a este tipo de reforço devido às elevadas tensões superficiais, assim como à necessidade de evitar o aparecimento de fugas derivadas de potenciais impactos.

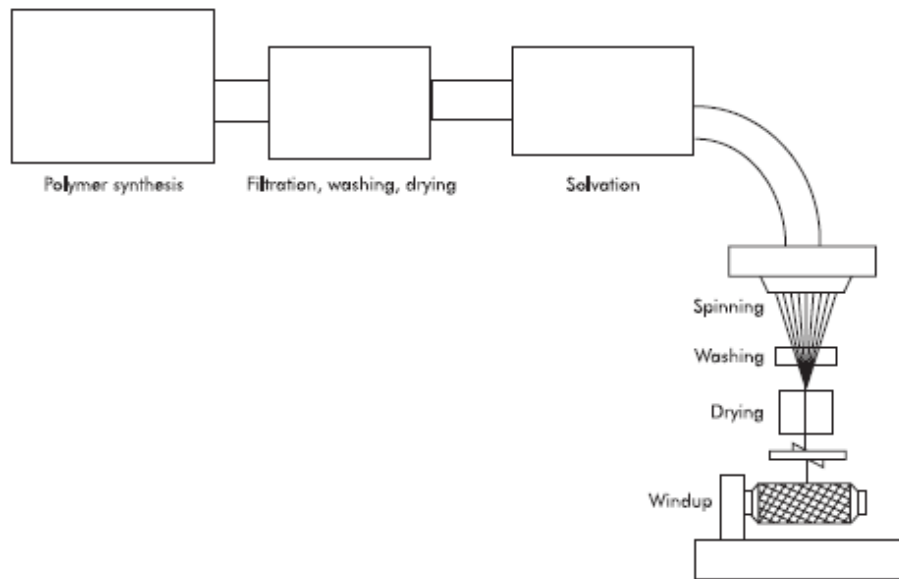


Figura 2.14 – Esquema de obtenção fibras aramídicas [33].

As fibras aramídicas são comercializadas em vários graus, obtidos através de alterações nos processos de fabrico que conferem um grau superior ou inferior de cristalização. Alguns exemplos são o Kevlar 29 (elevada tenacidade), Kevlar 49 (módulo de elasticidade elevado) e o Kevlar 149 (módulo ultraelevado). Algumas propriedades podem ser observadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas. Adaptado de [33].

	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>	<i>Extensão após ruptura(%)</i>
<i>Kevlar 29</i>	3600	83	4
<i>Kevlar 49</i>	4000	131	2,8
<i>Kevlar 149</i>	3400	186	2

2.3. Matrizes

A matriz representa a fase contínua do compósito. Esta envolve e cobre o reforço, estando exposta diretamente ao ambiente, protegendo-o. Caso o reforço seja com fibras, devido à natureza da sua estrutura molecular organizada, estas apresentam propriedades elevadas na direção principal e vão diminuindo conforme o ângulo. Nestes casos, fora da direção principal das fibras, a matriz será a principal responsável pelas propriedades transversais do compósito. A matriz é também a fase que é sujeita em primeiro lugar às cargas impostas, sendo, por isso, um requisito que esta as transfira para o reforço de maneira eficaz. A qualidade desta transferência depende da interface entre o reforço e a matriz, que descreve o comportamento do

compósito na fronteira existente entre os vários constituintes. O estudo da interface é um tema complexo, mas de importância vital pois é a principal responsável pelo bom desempenho do produto final. A qualidade da interface depende da afinidade entre a matriz e o reforço a utilizar e, por este motivo, não é certo que, por exemplo, uma combinação de fibras com boas propriedades embebida numa matriz, também ela com boas propriedades, origine um compósito com um desempenho muito superior.

Atualmente, as resinas mais utilizadas como matriz polimérica são as resinas termoendurecíveis, existindo atualmente uma quantidade elevada de informação acerca de compósitos com este tipo de matriz. Exemplos de resinas termoendurecíveis são as resinas de epóxido (mais utilizadas), fenólicas e poliésteres insaturados. Propriedades de várias resinas termoendurecíveis são apresentadas na Tabela 2.4. O fabrico de um compósito com recurso a estas resinas é realizado impregnando as fibras com a resina ou empilhando pré-impregnados que serão posteriormente sujeitos a um processo de cura. Durante este processo, por meio da temperatura e da pressão, as moléculas da resina criam ligações covalentes entre si, criando cadeias moleculares muito longas (polímeros), fazendo com que o material solidifique. Até há pouco tempo esta reação era considerada irreversível, pelo que as matrizes termoendurecíveis eram vistas como não recicláveis. No entanto, hoje em dia a reciclagem destas matrizes é possível através da despolimerização. As principais desvantagens são o ambiente de trabalho prejudicial à saúde devido à libertação de voláteis e o tempo limitado de armazenamento pois mesmo à temperatura ambiente os pré-impregnados continuam a reagir, embora lentamente, o que faz com que ao fim de algum tempo o pré-impregnado se torne rígido demais para ser manuseado.

Tabela 2.4 – Propriedades de várias resinas termoendurecíveis [13].

<i>Tipo</i>	<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>	<i>Deformação na rotura (%)</i>	<i>Coefficiente de dilatação (10⁻⁶/C)</i>
<i>Époxido</i>	1,1-1,4	35-90	2,1-6	1	55-110
<i>Poliéster</i>	1,1-1,5	45-85	1,3-4,5	1,5	100-200
<i>Fenólica</i>	1,3	50-60	4,4	2,5	45-110
<i>Poliimida</i>	1,2-1,9	80-190	3-3,1	1,2-1,9	1490

Embora as resinas termoendurecíveis sejam as mais utilizadas, tem-se verificado um aumento do uso de matrizes termoplásticas. O processamento de compósitos com matrizes termoplásticas apresenta vantagens como a não necessidade de cura, tempo de armazenamento “infinito” e um ambiente de trabalho mais saudável devido a serem quimicamente inertes. Contudo, o seu processamento ainda constitui um desafio e a sua evolução será um dos maiores impulsionadores da utilização deste tipo de materiais em compósitos. A necessidade da introdução de calor para que estes derretam e a viscosidade muito elevada deste tipo de materiais tornam a impregnação do reforço complicada, especialmente no fabrico de produtos de dimensões consideráveis. Em aplicações de elevado desempenho inúmeros estudos têm sido

dedicados à utilização de PEEK (*Polyether ether ketone*) como matriz em vez de resinas do tipo epóxico. A utilização desta matriz apresenta propriedades mecânicas semelhantes e resistência à fratura interlaminar muito superior devido à sua tenacidade. Devido à natureza inerte dos polímeros termoplásticos, a interface com o reforço não é tão forte quando comparada com matrizes termoendurecíveis que, devido ao processo de cura, têm possibilidade de criar ligações com as fibras [34]. Contudo, têm sido feitas pesquisas de modo a aumentar o nível das ligações com recurso a aditivos. Desta forma é em aplicações menos exigentes que o uso de compósitos de matriz termoplástica tem vindo a crescer mais rapidamente, cujos exemplos de matrizes são o PET [35] e o ABS [36]. Matrizes termoplásticas são também muito utilizadas em compósitos reforçados com madeira (*WPC – Wood Plastic Composites*). Exemplos de matrizes termoplásticas utilizadas nestas aplicações são o PE e o PVC [37]. Na Tabela 2.5 pode-se observar as propriedades de vários polímeros termoplásticos.

Tabela 2.5 – Propriedades de várias resinas termoplásticas. Adaptado de [13].

<i>Material</i>	<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Elongação na rotura (%)</i>	<i>Temperatura de transição vítrea (°C)</i>	<i>Coefficiente de dilatação linear (10⁻⁶/C)</i>
ABS	1,04	45	2	22	80-120	10
POM	1,14	65	3,2	22-75	110-125	11
PMMA	1,18	65	3	2-8	65-00	6,5
PA 6.6	1,14	75	2,4	60-300	66-110	9
PA 12	1,01	70	1,6	250-300	60-110	11
PC	1,18	61	2,5	115	130-154	5,5
PES	1,32	78	2,7	30-80	203	5,5
PE	0,94	22	0,8	100-1200	30-55	19
PEEK	1,3	100	3,9	40 ou superior	245	5
PET	1,34	55	2,8	50-300	60-80	9,5
PP	0,91	32	1,3	100-1000	45-60	11,5
PVC	1,40	50	2,25	10-300	60-80	7,5

2.4. Compósitos Híbridos

Nas secções anteriores foram apresentados os materiais compósitos e os seus principais constituintes. Foi anteriormente referido que os materiais compósitos são, na maior parte das aplicações, materiais bifásicos, sendo as fases o reforço e a matriz. No entanto, não é com surpresa que a certo ponto se considerou a combinação de reforços diferentes embebidos na mesma matriz ou na utilização de uma matriz constituída por diversos materiais. A estes compósitos dá-se o nome de compósitos híbridos e trazem com eles novas soluções porque aumentam a já elevada flexibilidade na obtenção de propriedades de acordo com cada tipo de aplicação. De acordo com Swolfs *et al.* [38] os compósitos híbridos podem ser classificados como intercamada quando o material é composto por camadas de diferentes materiais, intracamada se cada camada tiver dois ou mais tipos de fibras entrelaçados entre si e híbridos ao nível das fibras, que é uma combinação de vários tipos de fibras e que a partir desta se fabricam rolos ou tecidos com as percentagens pretendidas de cada elemento. A Figura 2.15 sumaria as descrições realizadas até agora.

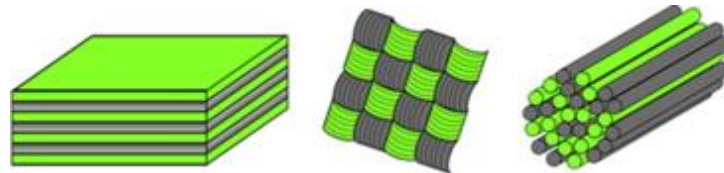


Figura 2.15 – Compósitos híbridos intercamada, intracamada e hibridização de fibras, da esquerda para a direita. Adaptado de [38].

Os compósitos híbridos permitem a obtenção de soluções muito interessantes, como é apresentado por Weaver [39] que menciona resultados animadores utilizando híbridos com camadas de compósito de fibras de carbono e linho, que com igual número de camadas de cada tipo conseguiu obter a mesma energia de absorção de impacto que um compósito inteiramente em carbono. Em adição a isto é referido na mesma publicação que o híbrido em questão apresenta rigidez similar a um compósito reforçado com fibras de carbono, mas com um custo reduzido e um impacto ambiental menor.

Para além dos grupos mencionados acima, mais recentemente tem-se verificado um crescimento de um tipo de compósitos híbridos a que se dá o nome de compósitos híbridos de colocação preferencial, cuja particularidade consiste na utilização de diferentes materiais que, ao invés de serem dispostos em camadas alternadas, são colocados nas áreas onde se extraem mais benefícios. O braço da suspensão e portador do diferencial da Figura 2.16 são exemplos desta classe de compósitos híbridos, onde é possível verificar a aplicação de compósitos de fibra de carbono em zonas específicas de cada componente. No primeiro caso é apontada um aumento de 26% na rigidez enquanto no segundo caso foi possível reduzir o peso em 40% e aumentar a resistência em 10% [40, 41].

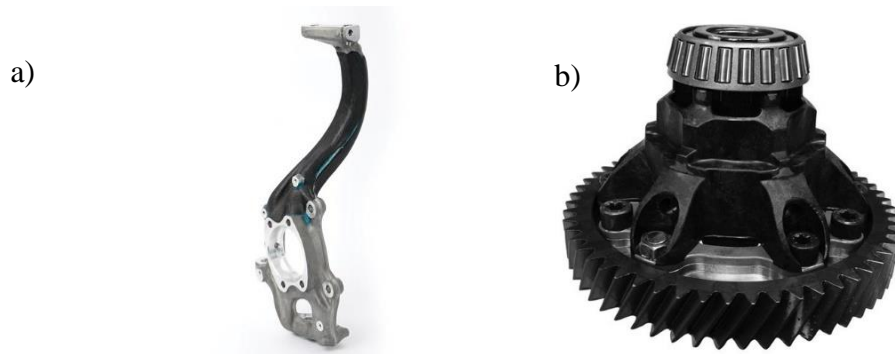


Figura 2.16 – Compósitos híbridos de colocação preferencial: a) braço de suspensão e b) portador do diferencial [40, 41].

Um dos benefícios deste tipo de compósitos híbridos é uma redução dos custos devido à utilização de materiais mais caros apenas em locais que se considerem beneficiar bastante da sua utilização ao invés de se criar todo um componente nesse mesmo material.

Wang [42] comparou as propriedades mecânicas de híbridos com fibras de carbono e fibras de vidro com um compósito exclusivamente de fibra de carbono, com vista à sua aplicação na indústria automóvel. Foi observado que um compósito híbrido com o mesmo número de camadas de compósito de fibra de vidro e de fibra de carbono apresenta propriedades à flexão próximas quando comparadas com um compósito exclusivo de carbono. Wang evidenciou também a influência da sequência de empilhamento nas propriedades do material, sendo as propriedades mecânicas maximizadas quando as camadas de fibra de carbono se encontram nas extremidades do compósito, indo de encontro à tipologia da colocação preferencial mencionada acima.

2.4.1. Híbridos Compósito-Metal

Os híbridos compósito/metal, mais conhecidos por *FML – Fiber Metal Laminates*, são uma subcategoria dos compósitos híbridos intercamada. São, portanto, constituídos por camadas de diferentes materiais, sendo um deles um compósito e o outro um metal. Sinmazçelik *et al.* [43] elaboraram uma revisão que permite uma boa introdução ao tema. Na publicação é apresentado um breve enquadramento temporal, referindo que este tipo de materiais foi criado na *Delft University of Technology*, Holanda, onde foi verificado que a propagação de fendas era reduzida quando se utilizava um material laminado com as camadas empilhadas recorrendo a juntas adesivas, em vez de uma única camada de material com a espessura desejada. A partir desta investigação, em 1978 foi criado o primeiro FML, denominado de ARALL. Este compósito era constituído por camadas de alumínio e de compósito feito a partir de resina de epóxico e de fibras aramídicas e apresentava uma resistência à fadiga excelente. O motivo deveu-se à utilização do compósito, que atenua a intensidade da tensão na região da fenda, esquematizada na Figura 2.17.

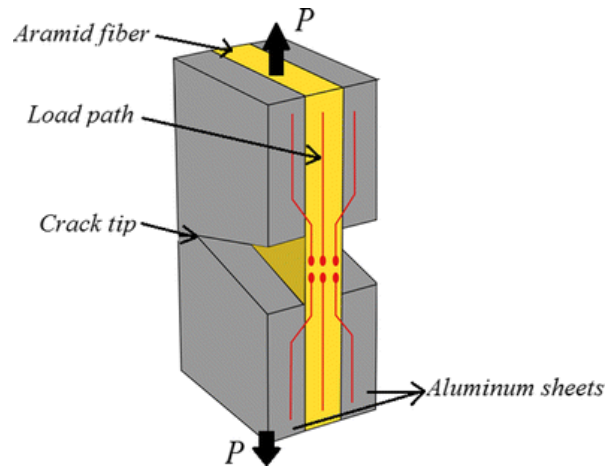


Figura 2.17 – Atenuação da intensidade de tensão na vizinhança da fenda no compósito híbrido ARALL [44].

Em 1984, a produção em massa deste material foi iniciada, após ter gerado confiança suficiente aos fabricantes. Desde então vários tipos de ARALL foram criados, utilizando diferentes tipos de alumínio. Após o sucesso deste material outras soluções foram criadas a partir deste conceito. A utilização de fibras de vidro em vez de fibras aramídicas deu origem ao GLARE que apresentam melhor adesão ao metal e resistência à compressão. A adesão superior permite a utilização deste material em situações onde se verificam tensões biaxiais e, por isso, torna-o mais versátil. Atualmente este conceito já existe também aplicado às fibras de carbono, dando-se o nome de CARALL. Quando comparados com o ARALL, os primeiros apresentam um desempenho superior à fadiga em cargas de frequência elevada e a elevada rigidez da fibra de carbono permite uma taxa de propagação das fendas inferior. Os híbridos compósito/metal enaltecem, portanto, as boas propriedades de cada material ao mesmo tempo que atenuam as desvantagens de cada um. As principais vantagens destes materiais em relação à utilização isolada de metais ou plásticos reforçados com fibras estão resumidas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Vantagens dos *Fiber-Metal Laminates* [43].

<i>Vantagens</i>
<i>Boa resistência à fadiga</i>
<i>Boa resistência</i>
<i>Boa resistência ao impacto</i>
<i>Boa capacidade de absorver energia</i>
<i>Baixa densidade</i>
<i>Boa resistência à humidade</i>
<i>Boa resistência à corrosão</i>
<i>Resistência ao fogo</i>

Os híbridos metal/compósito até agora descritos utilizam o alumínio como metal, mas atualmente são também usados outros metais associados com materiais compósitos, em especial o Titânio que é cada vez mais utilizado na indústria aeronáutica, por vezes combinado com o alumínio e CFRP em simultâneo. Na Figura 2.18 apresenta-se um pequeno resumo dos vários tipos de híbridos compósito/metal existentes.

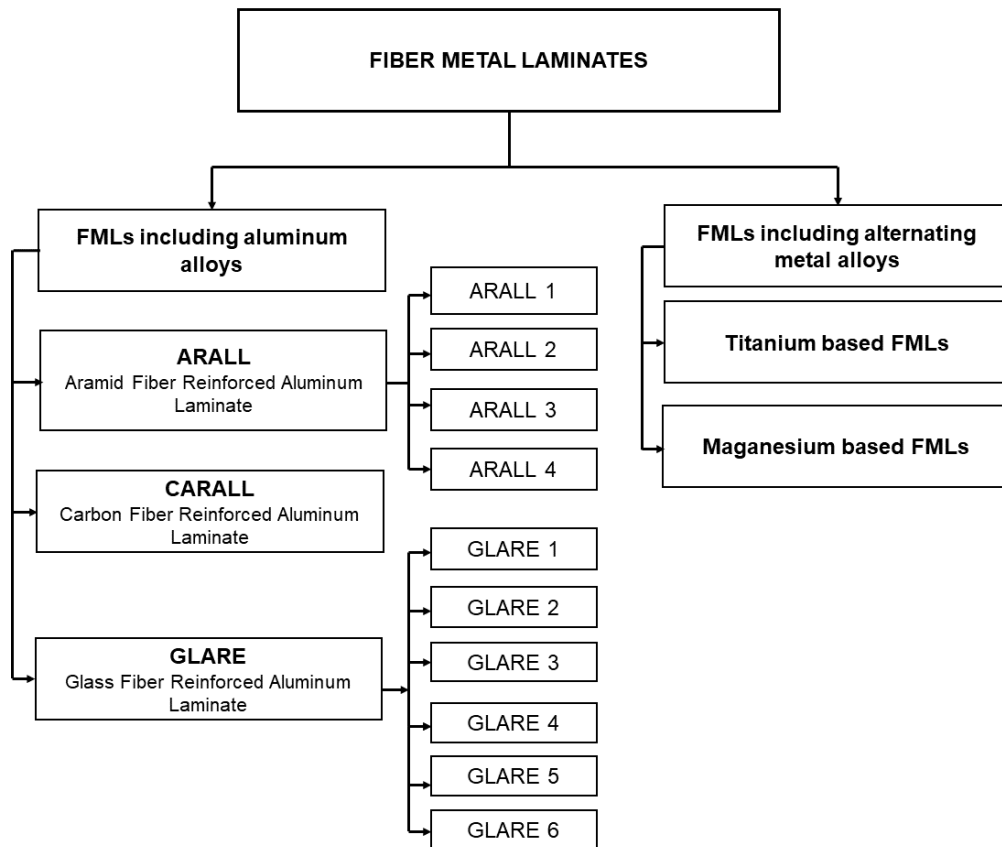


Figura 2.18 – Tipos de *Fiber-Metal Laminates*. Adaptado de [43].

As desvantagens destes materiais residem no preço elevado e no tempo de fabrico, devido à necessidade de cura do compósito. No entanto, o custo inicial elevado pode ser compensado pela redução do número de partes necessárias para se obter um componente completo, diminuindo o custo com a mão de obra. Para além disto, a boa resistência à fadiga permite um maior espaçamento dos períodos de manutenção assim como um menor número de reparações a danos causados por este fenómeno.

Na mesma publicação [43] é abordado também o fabrico deste tipo de materiais, apontando que a produção de híbridos compósito/metal é, geralmente, realizada com recurso a autoclave e envolve, de maneira geral, os passos descritos abaixo:

1. Preparação dos materiais, que consiste na preparação da superfície do metal por forma a aumentar o nível de adesão com o compósito
2. Deposição/*lay-up* dos materiais no molde
3. Processo de cura

4. Relaxação de tensões por forma a remover as tensões residuais resultantes do processo de cura. O seu aparecimento é devido às diferenças de elasticidade de cada material e são prejudiciais ao bom funcionamento do híbrido metal/compósito. O metal fica normalmente tracionado e as fibras comprimidas.
5. Inspeção do produto final

A interface entre o metal e o compósito constitui a zona crítica destes materiais. Por este motivo, a preparação da superfície do metal é dos passos mais importantes do fabrico e é essencial para uma vida longa do componente em questão. A superfície do material é, portanto, sujeita a um tratamento superficial por forma a promover uma adesão melhorada com o compósito. De acordo com a classificação apresentada em [43], os tratamentos podem ser:

- Mecânicos: criação de uma superfície com macro rugosidade com recurso ao processo de granalhagem, por exemplo. Outro método consiste na utilização de uma lixa para preparar a superfície.
- Químicos: o metal é mergulhado numa solução ácida, normalmente de ácido sulfúrico e dicromato de potássio.
- Eletroquímico: pode ser visto como uma evolução do ponto anterior. Neste processo é realizada a anodização do metal através da imersão deste num banho ácido sujeito a corrente elétrica. O resultado é o aparecimento de um filme óxido na superfície com micro rugosidade elevada e boa resistência à oxidação/corrosão. É muito utilizado na indústria aeronáutica.
- Utilização de primários/agentes de ligação: uma ligeira camada destes produtos é aplicada na superfície do metal para melhorar a adesão entre este e o compósito. O silano tem suscitado interesse na sua utilização para substituir os pré-tratamentos químicos pois são amigos do ambiente e compatíveis com vários tipos de aço. Outra solução passa pela utilização de sol-géis que possuem boa estabilidade química e boa resistência. Os sol-géis apresentam também boas propriedades térmicas e elétricas e são mais resistentes ao desgaste, à corrosão, à erosão e à oxidação.
- Tratamentos a seco: criados com o objetivo de substituir os tratamentos químicos, estes podem ser realizados recorrendo a lasers, plasma ou deposição de iões. O tratamento laser foi utilizado para alterar a superfície do metal e apresentou bons resultados, mais especificamente uma ligação mais forte e duradoura. A deposição de iões é um processo que limpa e modifica a superfície pulverizando-a com iões de Árgon sob vácuo. O tratamento com plasma pode ser de dois tipos: frio, que opera a temperaturas menores que 733 K ou quente, que opera entre os 10.000 e 100.000 K. Destes dois, o plasma frio é o mais utilizado, sendo uma solução eficiente e económica de preparar as superfícies.

O processo de autoclave permite um resultado muito satisfatório, mas é um processo dispendioso devido às necessidades energéticas elevadas. A NASA [45] investigou formas de

produzir FMLs fora do autoclave, mais especificamente recorrendo ao processo VARTM (*Vacuum Assited Resin Transfer Moulding*) com algumas adaptações. Uma das adaptações consistiu na utilização de camadas de metal perfuradas de forma a possibilitar a passagem de resina por estas, Figura 2.19. Outra solução consiste na aplicação de um revestimento metálico nas fibras/pré-impregnado antes da injeção. Esta deposição é realizada recorrendo a plasma, que derrete as partículas de metal. Os resultados mostraram que a primeira solução é mais satisfatória, fornecendo propriedades mecânicas superiores.

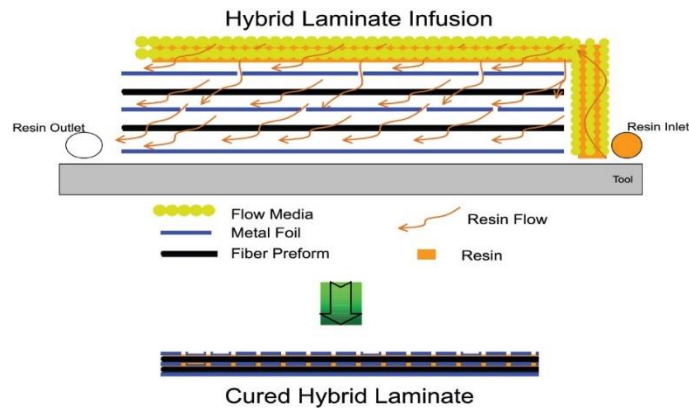


Figura 2.19 – Fabrico de *Fiber-Metal Laminates* pelo processo de VARTM utilizando placas metálicas perfuradas [45].

Khan *et al.* [46] abordaram o efeito da preparação da superfície na delaminação de compósitos CARALL obtidos pelo processo de VARTM e os resultados apresentaram vantagem para produtos sujeitos a tratamentos mecânicos e químicos antes do empilhamento das camadas e injeção de resina. Hilmar *et al.* [47] mencionam que o processo de produção requer atualmente muito trabalho manual e apresentam uma solução para automatizar o empilhamento das várias camadas que resultam numa diminuição do peso final da estrutura, assim como em tolerâncias menores. Esta solução é apresentada na Figura 2.20. Mais recentemente Amorim [48] abordou o fabrico de perfis híbridos através de pultrusão e obteve resultados interessantes. Lauter *et al.* [49] procuraram otimizar a resina utilizada por forma a diminuir os tempos de produção de híbridos compósito/metal. Para além dos tempos de produção reduzidos, a resina otimizada permite em conjunto a utilização de uma temperatura de cura menor, benéfica no que às tensões residuais diz respeito.



Figura 2.20 – Área de testes para o empilhamento automatizado dos materiais para fabrico de *Fiber-Metal Laminates* [47].

2.4.2. Híbridos com Aço

Através do que foi descrito no ponto anterior, e com a ajuda da Figura 2.18, é correto assumir que a maior parte da investigação em híbridos metal/compósito utiliza o alumínio como metal de base. No que toca a este tipo de materiais o aço não tem sido alvo de muita investigação, muito devido à sua falta de compatibilidade com os requisitos da maioria das aplicações atuais dos FMLs, onde a procura por reduções de peso é de elevada importância. No entanto, mais recentemente, compósitos utilizando aço têm suscitado algum interesse, em particular na indústria automóvel para segmentos de veículos mais comuns onde a busca por performances elevadas não é o objetivo principal. Refira-se que atualmente o chassi da maior parte dos automóveis ainda contém uma percentagem considerável de aço. É este uso intensivo de aço que em conjunto com os avanços e a existência de mais informação acerca dos FMLs levou a um aumento no interesse em híbridos que utilizem este material. Pereira *et al.* [50] abordaram o fabrico deste material, estudando sua processabilidade e apontando várias considerações durante o processo. Este assunto foi posteriormente abordado por Monge [51], onde na sua dissertação de mestrado se encontra reunida uma quantidade pertinente de informação acerca destes materiais, assim como trabalhos experimentais realizados pelo autor com o objetivo de verificar os níveis de adesão entre o compósito e o aço e as propriedades mecânicas resultantes desta combinação de materiais com e sem tratamento superficial. Uma tese de doutoramento com objetivos similares foi realizada anteriormente por Dymacek [52], utilizando aços inoxidáveis. Referências a este material são realizadas também por Alderliesten [53], que aponta o aparecimento muito raro de corrosão galvânica, assunto investigado e confirmado por Viandier *et al.* [54], e uma rigidez superior quando comparado com o alumínio e o titânio como as maiores vantagens na utilização deste material que vê na sua densidade elevada a sua maior desvantagem. Na mesma publicação é referida a realização de estudos com chapas finas deste material (espessura de aproximadamente 0.1 mm) mas com repercussões no desempenho à compressão devido à estabilidade insuficiente para evitar o aparecimento de encurvadura.

Liu *et al.* [55] investigaram o desempenho à fadiga de híbridos aço/carbono e verificaram que a espessura das camadas de carbono tem um efeito importante na resistência à fadiga e no mecanismo de falha do material. Os resultados apontam para uma vida quase duas vezes superior quando comparado com o aço isoladamente. A adicionar a isto não se verificaram falhas catastróficas do material, observando-se em vez disso uma propagação estável da fenda, Figura 2.21. Os autores mencionam uma redução no fator de intensidade de tensão devido à presença do carbono, resultados que vão de encontro aos referidos em [43].

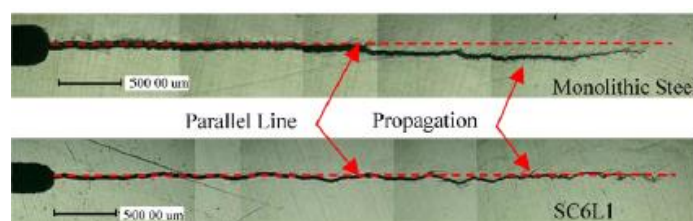


Figura 2.21 – Propagação de fenda obtida para aço monolítico e compósito híbrido aço/carbono. Adaptado de [55].

Compósitos híbridos de aço e compósitos de fibras de carbono ou fibras de vidro sujeitos a solicitações dinâmicas axiais e de flexão foram investigadas por Dlugosh *et al.* [56] com o intuito de verificar a sua capacidade de absorver energia proveniente de impactos. Neste aspeto a combinação de aço com compósitos de fibras de vidro provou ser mais eficiente, apresentado menores áreas danificadas e métodos de rotura de menor severidade.

Langdon e Rowe [57] estudaram o comportamento de FMLs constituídos por aço e um compósito de polipropileno reforçado com fibras de vidro sujeitos a impacto e os resultados evidenciaram um desempenho superior em relação ao GLARE, mas inferior à utilização exclusiva de metal. O material proposto apresentou um bom compromisso no que a este tópico diz respeito, a que se adicionam as outras vantagens já enunciadas dos híbridos desta natureza.

Uma investigação acerca da produção de FMLs utilizando compósitos de matriz termoplástica é apresentado por Hausmann *et al.* [58], que se focaram nas tensões residuais resultantes do processo de produção. O titânio é destacado pela positiva devido ao seu coeficiente de dilatação térmica e ao seu módulo de elasticidade. O alumínio apresentou o maior nível de tensões residuais e o módulo de elasticidade elevado do aço é apontado como causa das tensões verificadas em híbridos com este material. Ainda dentro do tema das tensões residuais, Prussak *et al.* [59] focaram-se na investigação do seu aparecimento em compósitos aço/CFRP durante o processo de fabrico por autoclave. Foi verificado que o nível de tensões residuais é bastante influenciado pela variação dos parâmetros operacionais, Figura 2.22, com especial destaque para o valor da pressão que permitiu uma redução significativa. A utilização de ciclos de cura modificados, com vários períodos de aquecimento e arrefecimento, permite uma redução da temperatura de adesão entre as camadas de CFRP e aço, o que resulta também numa redução das tensões residuais.

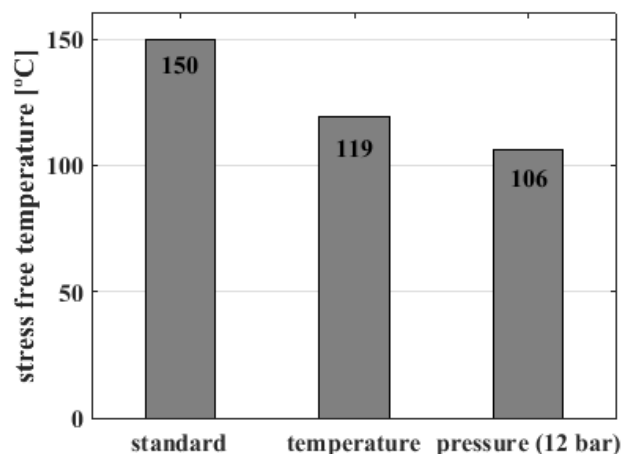


Figura 2.22 – Tensões residuais resultantes do fabrico de híbridos aço/CFRP através do processo normal, com ciclo de cura modificados e utilizando pressões elevadas (12 bar vs 6 bar recomendados pelo fabricante).

Adaptado de [59].

Há cerca de uma década, Suárez e Herreros [60] criaram um FML de aço e fibras de vidro embebidas em viniléster a que chamaram *Malécon*. Este material é fabricado por VARTM e foi elaborado a pensar em aplicações na indústria naval. Entre as principais vantagens encontram-

se um desempenho à fadiga superior, resistência ao impacto melhorada, boa absorção de ruído, melhor controle dos efeitos de corrosão devido à presença da matriz polimérica e resistência ao fogo superior. Ainda dentro deste tema, Reyes e Cantwell [61] estudaram o fabrico de FML de baixo custo para a indústria automóvel utilizando aço e compósitos de matriz termoplástica. O autor apresenta resultados que considera animadores, verificando bons níveis de adesão e boa resistência à fratura, utilizando aço e um compósito com matriz de polipropileno reforçada com fibras de vidro. Dando continuação a este tema, Reyes [62] aprofundou a pesquisa acerca destes materiais e procurou um método eficaz de fabricar FML com compósitos de matriz termoplástica, onde uma pequena abordagem ao uso de aço (DP500) foi realizada. O aço foi combinado com um compósito de fibras de polipropileno (PP) embebido numa matriz também ela de PP e com um compósito de fibras de vidro embebidos numa matriz de PP. Quando comparado com o Alumínio combinado com os mesmos compósitos estes apresentam tenacidades da mesma ordem de magnitude, Figura 2.23, significando a existência de boa adesão entre os constituintes. Adicionalmente foi constatado que o FML de aço apresenta boa tenacidade à fratura interlaminar, embora menor que FML's de alumínio. Foi verificado também que a utilização de aço é vantajosa em carregamentos quasi-estáticos, apresentando valores de cedência similares aos do FML de alumínio, rigidez superior e comportamento superior no domínio da plasticidade. Em regime dinâmico o uso de híbridos baseados em aço apresenta também um comportamento interessante, excluindo regimes de frequência elevadas onde FML's de alumínio são claramente superiores. Curvas carga-descolamento para várias velocidades podem ser observadas na Figura 2.24.

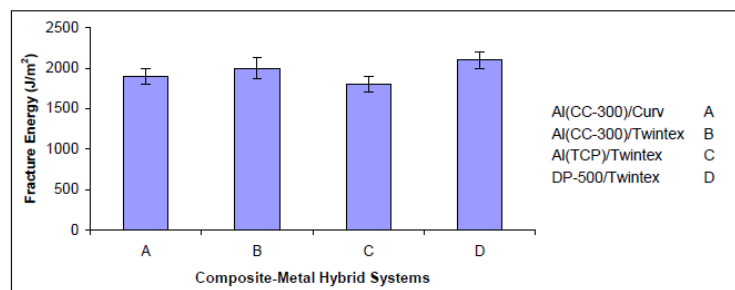


Figura 2.23 – Tenacidade à fratura interlaminar dos vários híbridos testados. *Curv* e *Twintex* são as denominações comerciais para compósitos de PP reforçados com fibras de vidro e PP reforçado com fibras do mesmo material, respetivamente [62].

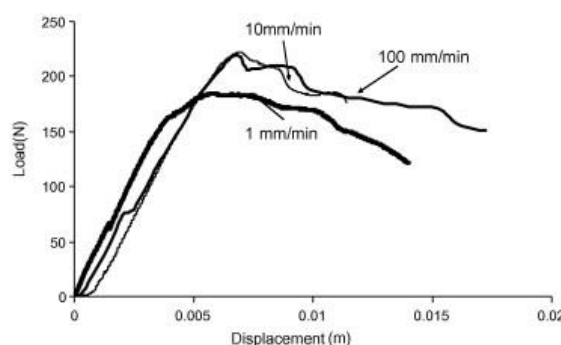


Figura 2.24 – Curvas carga-deslocamento do compósito de aço/CFRP para várias velocidades de carregamento [62].

Mais recentemente Osiecki *et al.* [63] investigaram compósitos híbridos utilizando aço e fibras de carbono numa matriz de poliamida. Os resultados destacam uma subida acentuada do módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras e deformação até à rotura superior. Yuksel *et al.* [64] procuram estudar os níveis de adesão direta entre aço e compósitos de fibra de carbono com matriz termoplástica. O aço foi sujeito a tratamentos superficiais de granalhagem com alumina, utilizada também em [51], e esta superfície foi revestida com um promotor de adesão. Em adição a estes tratamentos, uma película de PA6 foi adicionada na superfície tratada do metal para verificar a sua influência nos resultados, comparando com a sua ausência. No final foi concluído que a utilização do promotor de adesão apresenta os melhores valores de adesão, embora a diferença seja baixa quando comparada com a utilização da granalhagem, Figura 2.25. Verificou-se também que a utilização de PA6 influencia consideravelmente a resistência das juntas em ambos os casos.

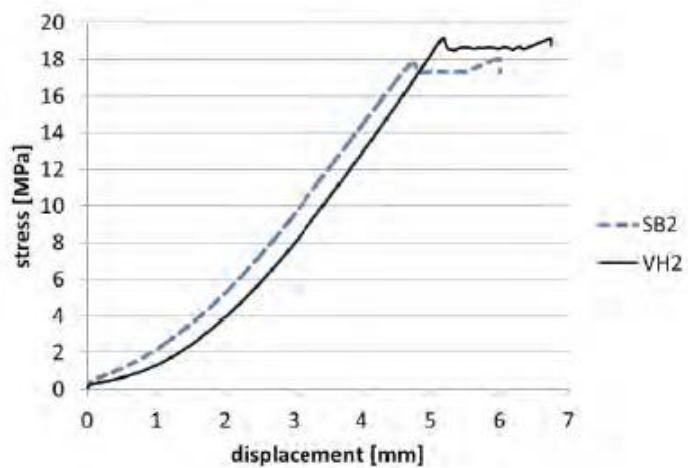


Figura 2.25 – Curvas Tensão-Deslocamento para compósitos híbridos aço/carbono com tratamentos superficiais de granalhagem (linha descontinua) e promotor de adesão (linha descontinua) [64].

Gall *et al.* [65] investigaram a ocorrência de delaminação em compósitos aço/carbono. Os autores analisaram a utilização de um tratamento superficial de fosforização e a utilização de finas camadas de material polimérico, polares e não-polares, entre as camadas de aço e carbono para fortalecer a ligação dos diferentes materiais. Os resultados foram comparados com um laminado constituído exclusivamente por fibras de carbono embebidos em resina de epóxico e demonstraram uma melhoria severa na tenacidade à fratura interlaminar utilizando camadas de material polimérico não-polar, Figura 2.26. A utilização deste material também apresentou benefícios notórios na vida à fadiga do material na presença de fendas, com taxas de crescimento menores que o compósito de carbono e uma menor sensibilidade à propagação de fenda, evidenciado pelo declive das regressões obtidas, representativas da Lei de Paris, Figura 2.27.

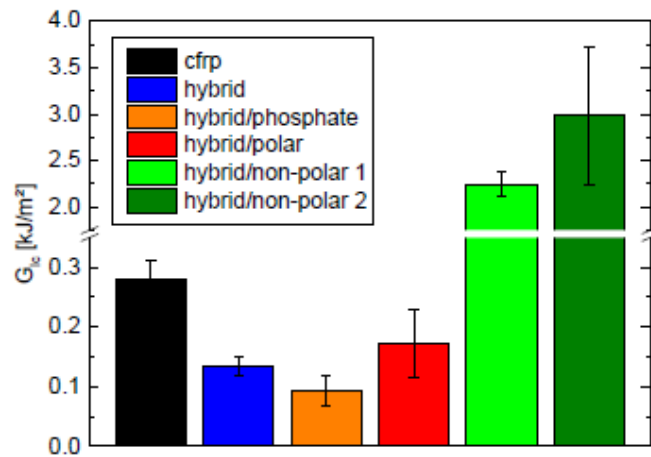


Figura 2.26 – Tenacidade à fratura interlaminar em modo I para compósitos de fibra de carbono e híbridos aço/carbono sujeitos a diferentes tratamentos superficiais antes do fabrico [65].

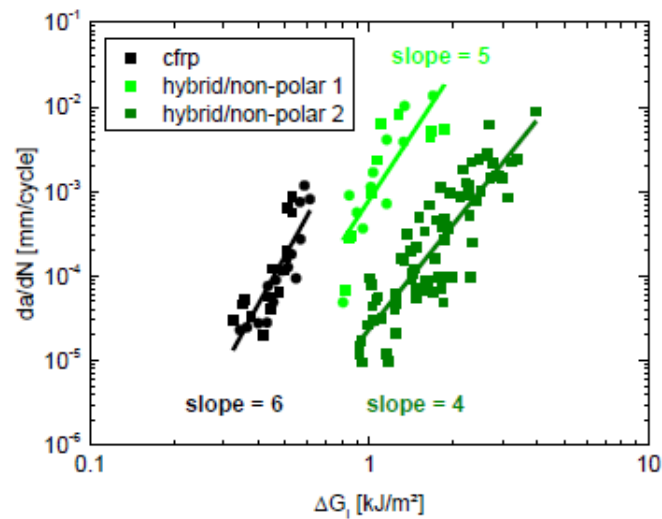


Figura 2.27 – Comportamento à fadiga de compósitos de fibra de carbono e híbridos aço/carbono com recurso a pequenas camadas de material polimérico não polar [65].

3. Processos de Maquinagem

Os processos de maquinagem convencionais de materiais são métodos de obtenção de geometrias finais através da remoção de material (arranque de apra) por corte usando uma ferramenta [66]. Os principais processos são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais processos de maquinagem [66].

<i>Processos de Maquinagem</i>
<i>Torneamento</i>
<i>Fresagem</i>
<i>Furação</i>
<i>Mandrilamento</i>
<i>Retificação</i>
<i>Corte</i>
<i>Brochagem</i>

A maquinagem de materiais pode ser feita manualmente (máquinas convencionais) ou de maneira automatizada, utilizando máquinas de controlo numérico computadorizado (CNC). O estudo da mecânica destes processos é frequentemente realizado com recurso ao modelo base de corte ortogonal, que simplifica a sua análise, mas fornece resultados aceitáveis do ponto de vista da engenharia. Contudo, caso se deseje ultrapassar as simplificações do modelo e obter resultados com precisão superior, atualmente recorre-se a modelos tridimensionais, normalmente baseados em soluções numéricas com recurso, por exemplo, ao método dos elementos finitos, onde se pode observar um exemplo da sua utilização na Figura 3.1.

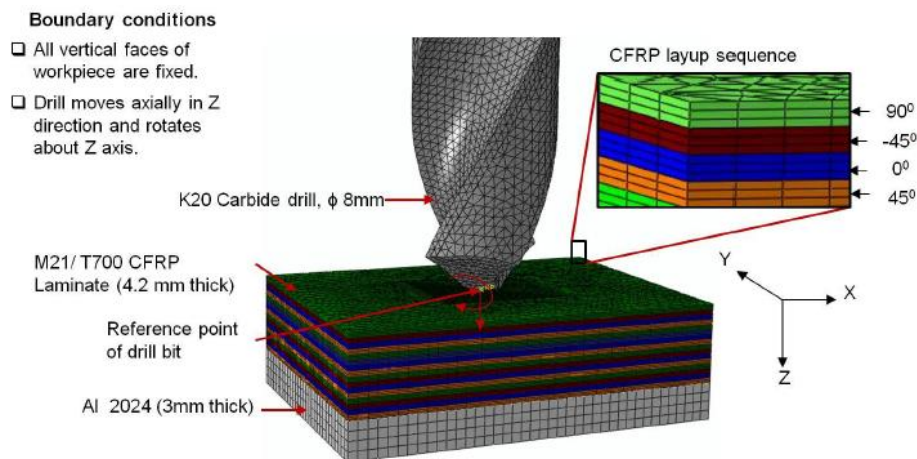


Figura 3.1 – Modelação numérica do processo de furação de um compósito híbrido de carbono e alumínio [67].

Cada um dos processos apresentados na Tabela 3.1 poderia ser alvo de uma extensa descrição. No entanto, neste trabalho o foco irá estar no processo de furação, o mais utilizado quando se trata de maquinar compósitos e o de interesse para o trabalho experimental realizado. Por este motivo, as secções seguintes terão uma abordagem mais detalhada deste processo, com especial foco na furação de compósitos de CFRP e híbridos com este material. Será também introduzido um método especial de furação, a furação orbital, que apresenta vantagens muito interessantes quando se trata de maquinar estes tipos de materiais.

3.1. Furação

A furação consiste na remoção de material com o objetivo de criar um furo. A ferramenta utilizada para esta operação é a broca, das quais existem diversos tipos e onde é apresentado em detalhe na Figura 3.2 a mais comum: a broca helicoidal. Os furos obtidos são, na maior parte dos casos, realizados para tornar possível a montagem de vários componentes, mas podem ser, também, utilizados com a finalidade de proporcionar a passagem de fluídos. Uma aplicação interessante utilizada no Airbus A310 consiste na criação de pequenos furos nas asas dos aviões por forma a reduzir a turbulência do ar e incrementar a eficiência aerodinâmica. Quanto à geometria dos furos, estes podem ser passantes ou cegos, caso não atravessem a totalidade da peça. Se classificados quanto à sua obtenção estes podem ser em cheio, ou seja, utilizando uma broca com o diâmetro final do furo ou faseados, em que se realiza primeiro um furo de menores dimensões e numa passagem posterior se obtém o diâmetro final.

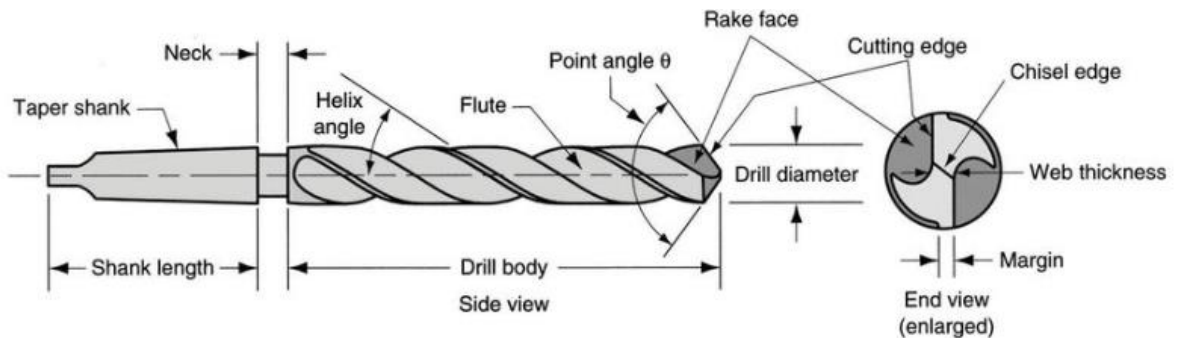


Figura 3.2 – Broca helicoidal [68].

Na operação de furação a ferramenta é dotada de um movimento de rotação e de um movimento axial ou de avanço, Figura 3.3. Os parâmetros de corte utilizados são a velocidade de corte (V_c), expressão (3.1), e o avanço por rotação (f), a partir do qual é possível obter a velocidade de avanço, expressão (3.2).

$$V_c = \frac{\pi DN}{1000} [m/min] \quad (3.1)$$

$$f_r = f \cdot N \text{ [mm/min]} \quad (3.2)$$

Onde N representa a frequência de rotação da ferramenta, em rotações por minuto (RPM), e D o diâmetro da ferramenta, em mm.

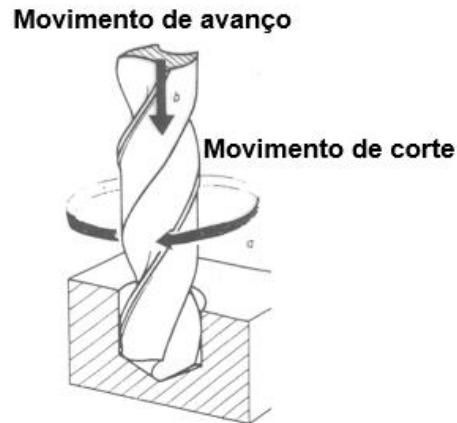


Figura 3.3 – Movimentos da ferramenta na operação de furação [66].

Estes movimentos fazem com que os principais esforços nesta operação sejam o esforço axial, representativo da força necessária para manter a velocidade de avanço constante e o binário, representativo do binário necessário para manter a velocidade de rotação constante.

Tanto os parâmetros de corte como os esforços a que a ferramenta está sujeita dependem das características de cada material, que, dependendo das suas propriedades, apresentarão maior ou menor dificuldade na sua maquinagem, o que do ponto de vista do fabricante influencia o material da ferramenta e a sua geometria. Materiais comuns, como o aço ou alumínio, são de maquinagem fácil, utilizando-se ferramentas fabricadas em aço com elevados teores de liga, chamados de aços rápidos, que possibilitam uma boa taxa de remoção de material com bom acabamento. Para materiais difíceis de maquinar recorre-se aos carbonetos de tungsténio (metal duro) e em casos mais extremos a ferramentas revestidas a diamante.

3.1.1. Furação de compósitos

A furação é, por larga margem, a operação de maquinagem mais utilizada quando se trata de maquinar materiais compósitos, seguida pela fresagem. À partida, a operação de furação pode parecer de dificuldade reduzida, devido ao percurso unidirecional da ferramenta, mas a natureza dos materiais compósitos levanta desafios característicos que não se encontram em outros materiais, como nos metais, por exemplo. Estes desafios frequentemente resultam na necessidade de operações adicionais para obter o acabamento desejado ou mesmo na rejeição da peça, aumentando significativamente os custos. Entre as várias dificuldades destaca-se a possibilidade de ocorrer delaminação, Figura 3.4, que consiste na separação de duas ou mais

camadas do compósito. A ocorrência de delaminação é o defeito que traz consequências mais severas, reduzindo drasticamente as propriedades mecânicas da peça, fazendo com que esta seja descartada.

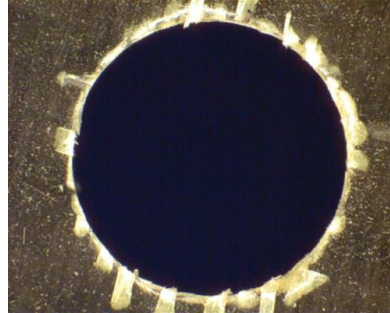


Figura 3.4 – Delaminação resultante do processo de furação [69].

A delaminação é mais suscetível de acontecer nas camadas exteriores do material, devido à não existência de suporte de um dos lados, existindo um tipo característico de delaminação consoante a zona em questão. Durante a entrada da ferramenta o seu movimento de rotação tende a puxar as camadas, a que se dá o nome de *peel-up*. No momento de saída da broca, esta empurra o material por alguns instantes ao invés de o cortar, devido à não existência de velocidade de rotação na ponta. A esta situação dá-se o nome de *push-out*. Estes dois fenómenos podem ser observados na Figura 3.5.

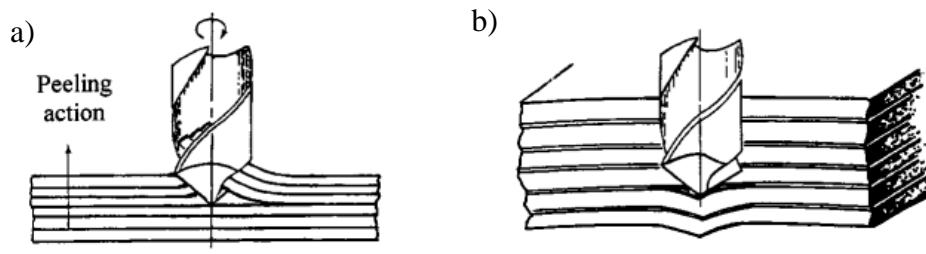


Figura 3.5 – Fenómenos de delaminação: a) *peel-up*; b) *push-out*. Adaptado de [70].

Um método simples de averiguar a sua severidade é através do fator de delaminação, expressão (3.3), em que considerando a zona delaminada como sendo circular se relaciona o diâmetro nominal do furo com o diâmetro desta zona [71]:

$$F_d = \frac{D_d}{D_f} \quad (3.3)$$

Onde D_d representa o diâmetro da zona delaminada e D_f o diâmetro do furo.

Entre estes dois fenómenos o segundo tem importância superior, cuja principal razão da sua aparição se deve à força axial exercida pela ferramenta. Hocheng e Dhahran [72] procuraram uma solução analítica para este problema recorrendo a conceitos de mecânica da fratura e chegaram à equação (3.4), representativa da força axial crítica abaixo da qual não existe delaminação:

$$F_c = \pi \left[\frac{8G_{Ic}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} [N] \quad (3.4)$$

Onde:

- E – Módulo de Young (GPa)
- ν – Coeficiente de Poisson
- h – Espessura não cortada (mm)
- G_{Ic} – Tenacidade à fratura em Modo I do material (MPa. $\sqrt{\text{mm}}$)

Esta equação parte do princípio de que, para não existir delaminação, o trabalho realizado pela força axial não pode superar a tenacidade à fratura do material. A expressão (3.4) é válida para brocas helicoidais, as mais utilizadas. Contudo, análises similares foram realizadas para brocas de geometrias diferentes e os resultados estão apresentados no Anexo A. Informação mais detalhada acerca dos resultados pode ser consultada em [72].

O modelo proposto por Hocheng e Dhahan considera o material como sendo isotrópico, mas sabe-se que a anisotropia é uma característica dos materiais compósitos. Deste modo, um modelo anisotrópico com o mesmo propósito foi desenvolvido por Jain e Yang [72], verificando que a zona delaminada apresenta uma forma aproximadamente elíptica para laminados multidirecionais, enquanto que no modelo de Hocheng e Dhahan esta zona é circular. Assim, o modelo resultante é função do rácio de elipsidade:

$$k = \frac{a}{b} \quad (3.5)$$

Onde a representa o eixo maior da elipse e b o eixo menor. No final, a expressão (3.4) de Hocheng e Dhahan evolui para a expressão (3.6):

$$F_c = \frac{3\pi}{k} \sqrt{2G_{Ic}D^*} [N] \quad (3.6)$$

Com:

$$D^* = D_{11} + \frac{2}{3}(D_{12} + 2D_{66})k^2 + D_{22}k^4 \text{ [GPa]} \quad (3.7)$$

Onde D_{11} , D_{12} , D_{22} e D_{66} são a rigidez à flexão segundo as várias direções. Dados experimentais demonstram que quanto maior o rácio de elipsidade maior a diferença entre a força axial crítica obtida por cada um dos modelos.

Abordagens analíticas como a apresentada acima são raras e difíceis de efetuar devido à complexidade do processo. Devido a esta complexidade a pesquisa por soluções baseia-se primariamente em trabalho experimental, através dos quais se criam modelos que relacionam os vários parâmetros através de análise estatística. Para além da procura pelos limites onde ocorre delaminação, investigações foram levadas a cabo com o intuito de aumentar estes mesmos limites. Um dos métodos mais utilizados para reduzir a delaminação à saída do material consiste na utilização de uma placa de suporte por forma a que a última camada não tenha liberdade total para se deformar e revela-se uma solução bastante eficaz, verificando-se um aumento da força axial crítica. Outra solução passa pela utilização de um pré-furo que faz com que o indentador da broca não empurre material, reduzindo também a ocorrência de delaminação. Soluções mais complexas passam pela furação assistida por vibração, ultrassons, laser, jato de água e descarga elétrica. Uma solução interessante utilizada por Wang *et al.* [73] consistiu na utilização de um suporte com amortecedores com o intuito de absorver as vibrações decorrentes do processo de maquinagem e um decréscimo da força axial durante o processo foi verificado.

Para além da delaminação, outros defeitos incluem o arrancamento de fibras, a decomposição da matriz devido às temperaturas de corte elevadas e o aparecimento de rebarbas (Figura 3.6). O tópico do arrancamento de fibras é também ele complexo. Devido à heterogeneidade do material, à medida que a ferramenta gira a aresta de corte cortará as fibras em ângulos diferentes. Isto resulta na existência de diferentes mecanismos de corte ao longo de cada rotação da ferramenta, Figura 3.7, que influenciam o acabamento superficial do furo. Da figura observa-se que para um ângulo de 135° o corte é acompanhado pelo arrancamento das fibras ou alternativamente estas não são devidamente cortadas, ficando com extremidades salientes, visíveis na Figura 3.8 e Figura 3.9. É patente da figura, e acordado por vários investigadores que o corte em torno destes ângulos corresponde a uma zona crítica no que à qualidade da superfície diz respeito [74] [75]. Aliás, as diferenças nesta zona, visíveis na Figura 3.10, são de tal maneira significativas que em [74] é questionada a utilização da rugosidade aritmética, R_a , para caracterizar a rugosidade da superfície, afirmando que um método de medição adequado para estes materiais deveria ser implementado.



Figura 3.6 – Rebarbas num furo em material composto [69].

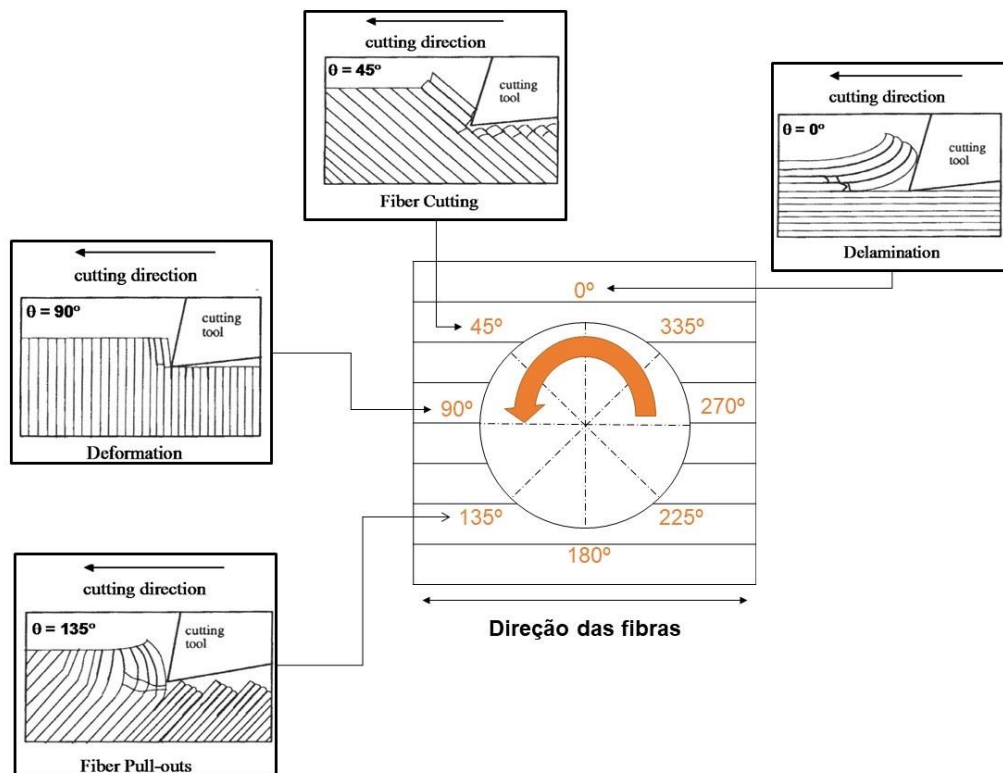


Figura 3.7 – Influência da rotação da ferramenta no corte das fibras de um sistema composto. Adaptado de [74].

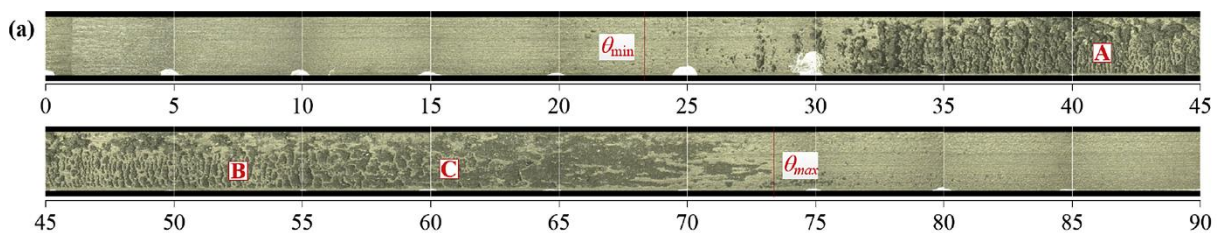


Figura 3.8 – Superfície maquinada de um composto de carbono unidirecional. Adaptado de [75]. Nota: a medição do ângulo foi realizada de maneira diferente. De acordo com a Figura 3.7 estes valores correspondem ao intervalo 90° - 180° .

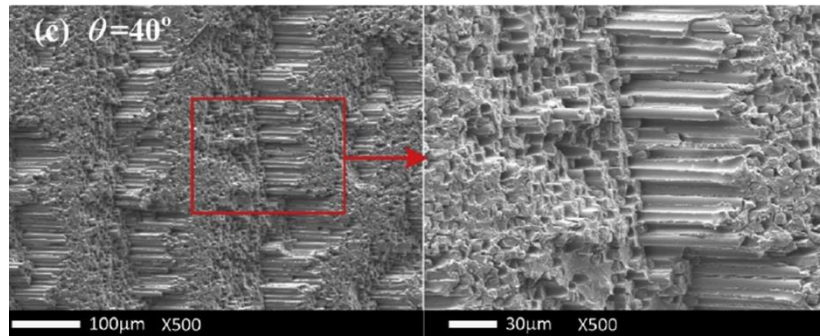


Figura 3.9 – Microscopia eletrônica da superfície maquinada de um compósito de carbono na zona com ângulo de 40° entre as fibras e a aresta de corte. Adaptado de [75]. Nota: a medição do ângulo foi realizada de maneira diferente. De acordo com a Figura 3.7 este valor é equivalente a 140° .

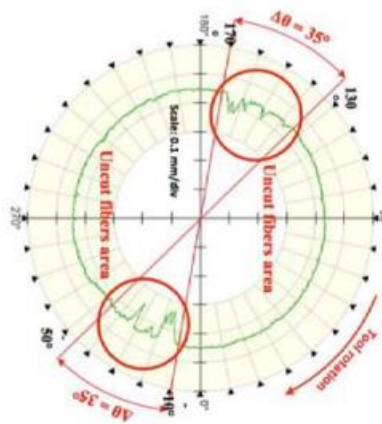


Figura 3.10 – Perfil da superfície de um furo de material compósito [74].

No que toca às ferramentas, a elevada dureza das fibras de carbono faz com que estas sejam muito abrasivas, resultando em taxas de desgaste muito elevadas como verificado por Poulachon *et al.* [74] que durante o seu trabalho experimental verificaram que ao fim de 22 furos estes começaram a estar fora das tolerâncias exigidas. Assim, apenas materiais adequados tornam possível a maquinagem de CFRP com qualidade e em quantidade aceitável. Tais materiais consistem em metais duros, muitas das vezes revestidos com TiAlN ou até mesmo com diamante. Acerca deste último, em 2015 a empresa *Element-Six* desenvolveu ferramentas em branco (*tool blanks*) de PCD que abriram portas à criação de ferramentas complexas obtidas a partir deste material [76].

Em termos de geometria da ferramenta, deseja-se que o ângulo de ponta seja elevado, como verificado por Durão *et al.* [77] e que o indentador seja o menor possível por forma a diminuir o esforço axial. Uma comparação entre geometrias helicoidais, *Brad* e bidiametral de dentes direitos foi apresentada pelo mesmo autor que no final aponta as geometrias helicoidal com ângulo de ponta elevado e a helicoidal bidiametral como as menos favoráveis ao aparecimento de delaminação. Em relação à broca de dentes retos um estudo foi apresentado por Fernandes e Cook [78] onde os esforços de corte foram caracterizados e divididos em 5 zonas: entrada, furação, furação e mandrilamento, mandrilamento e saída. Uma esquematização é apresentada na Figura 3.12.



Figura 3.11 – Ferramentas em branco (*tool blanks*) fabricadas em PCD [76].

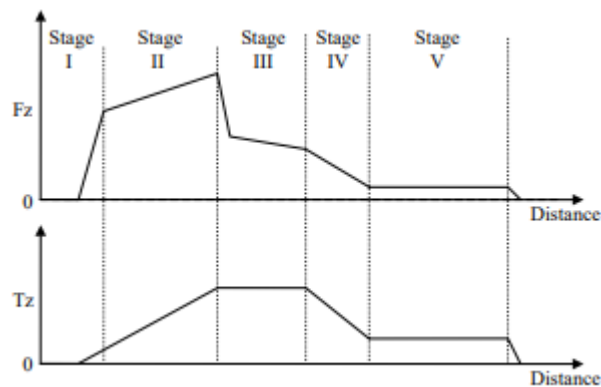


Figura 3.12 – Fases durante a operação de furação com broca de dentes direitos [78].

3.1.2. Furação de Híbridos Compósito-Metal

Se a furação de um material compósito é, por si só, bastante desafiante, quando combinado com um metal esta operação torna-se ainda mais exigente. As propriedades de cada material são bastante distintas pelo que a criação de furos com boa qualidade e regularidade ainda é problemática. A utilização de duas ferramentas, uma apropriada para cada material poderia ser uma solução, embora longe do ideal devido ao tempo necessário para a substituição destas. Deste modo, a maior parte da investigação foca-se na furação de compósitos multicamada com uma só ferramenta e, se possível, numa só passagem (*single shot drilling*).

Os FML mais utilizados consistem em combinações de compósitos reforçados com fibra de vidro ou carbono, alumínio e/ou titânio. A má condutibilidade térmica do titânio significa que a maior parte da dissipação do calor gerado é extraído através da apara. Como normalmente o compósito de carbono se encontra por cima, isto faz com que a apara a temperatura elevada tenha de passar pelo furo existente neste, o que pode levar à degradação da matriz. Devido ao módulo de elasticidade relativamente baixo do titânio a apara é contínua, o que leva a um mau acabamento do furo nas camadas de CFRP devido ao contacto existente entre a apara e a face do furo. O alumínio apresenta desafios similares, embora a sua maquinagem seja mais fácil e a

dissipação de calor seja melhor quando comparada com o titânio, devido à elevada condutibilidade térmica característica deste material. As diferenças nas propriedades dos materiais implicam exigências superiores no que às ferramentas diz respeito. Em adição à abrasividade das fibras a ferramenta é sujeita a solicitações de magnitude bastante diferentes pelo que a passagem de um material para outro é uma fase crítica do processo e onde os defeitos mais severos se verificam. A Figura 3.13 apresenta a evolução da força e do binário ao longo do processo de furação num FML carbono/alumínio. Repare-se no incremento elevado dos valores aquando da passagem para o metal, fruto da maior ductilidade deste.

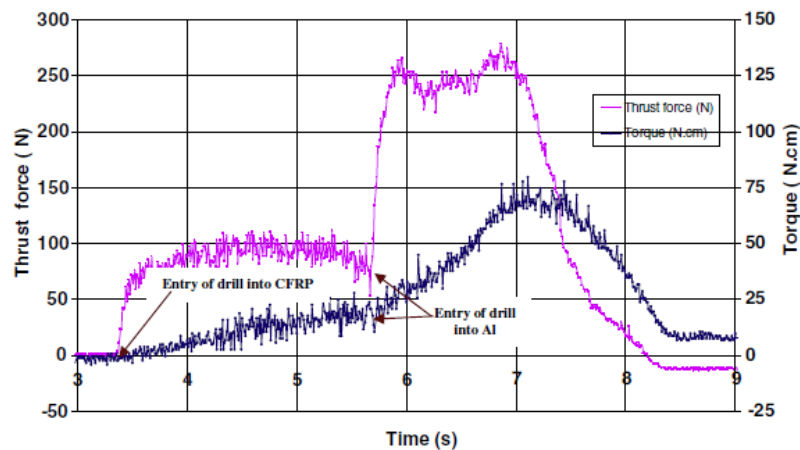


Figura 3.13 – Evolução dos esforços atuantes na ferramenta durante a furação de um FML CFRP/alumínio [79].

Pecat e Brinksmeier [80] investigaram a utilização de furação assistida por vibração em FML de CFRP/Titânio e verificaram temperaturas consideravelmente menores quando comparadas com a furação convencional, assim como menos rebarbas na saída do furo, erros menores no diâmetro obtido, melhor acabamento na zona de saída da camada de fibra de carbono e a não existência de danos na matriz.

Ramulu [81] experimentou a utilização de maquinagem não-convencional por eletroerosão para obtenção de furos, investigando a influência dos parâmetros de maquinagem (tempo de pulso, ciclo de trabalho/*duty cycle* e corrente máxima) na taxa de remoção de material tanto da peça de trabalho como da ferramenta e investigando também o efeito destes parâmetros no acabamento da peça, assim como propondo várias expressões de previsão em função destes. Foi verificado que, com os parâmetros certos, os resultados são satisfatórios, não existindo rebarbas e observando-se boa qualidade superficial.

Zitoun *et al.* [79] estudaram o efeito dos parâmetros de corte na furação de compósitos alumínio/carbono e os seus efeitos na ferramenta. Foi concluído que a velocidade de avanço é o parâmetro mais preponderante. Este resultado coincide com os apresentados por Padnis *et al.* [67] durante a sua investigação. Foi verificado também que a geração de aparas de pequenas dimensões é desejável porque à medida que suas dimensões aumentam a liberdade destas para se movimentarem reduz-se, originando esforços maiores. Além destes resultados verificou-se que o acabamento do furo na zona do metal era superior quando comparado com a zona de

CFRP. Um dos motivos apontados foi novamente a geometria da apara que durante a sua remoção fricciona na parede do furo e como consequência origina uma superfície mais rugosa.

Wang *et al.* [82] realizaram a furação de FML de carbono/alumínio com um detalhe interessante: a sequência de furação é contrária à mais comum, ou seja, a camada de metal é furada primeira e o compósito de carbono é furado no final. Os autores verificaram que a qualidade do acabamento do furo na zona do laminado de carbono aumentou consideravelmente e, para além da geometria da ferramenta, os autores apontam que a evacuação das aparas de alumínio tem uma grande influência neste resultado porque com esta sequência de furação a apara não entra em contacto com o compósito. Durante o procedimento foi verificado, também, que as temperaturas do processo são menores.

Kuo *et al.* [83] abordou a furação de FML constituídos por CFRP/Alumínio/Titânio, considerando a evolução do desgaste da ferramenta e a sua influência no resultado final. Os resultados demonstraram uma vida muito reduzida da ferramenta, mesmo utilizando parâmetros de corte de acordo com cada material. Ao final de apenas 30 furos, a ferramenta encontrava-se com fraturas na aresta de corte, sem revestimento e com material colado na aresta de corte (*BUE – Built Up Edge*), tornando-se inadequada para realizar mais furos de acordo com os padrões exigidos. Resultados similares foram obtidos por Shya *et al.* [84] que conseguiram uma vida da ferramenta superior através da utilização de lubrificação. Recorde-se, no entanto, que a utilização de lubrificação pode ser prejudicial para o laminado de carbono, podendo causar delaminação. A evolução do desgaste da ferramenta pode ser observada na Figura 3.14.

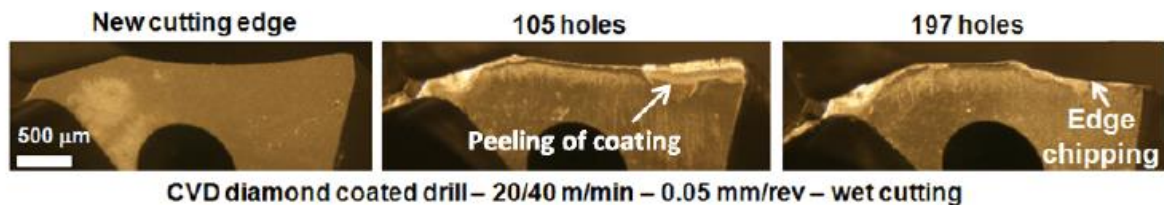


Figura 3.14 – Desgaste de uma broca revestida com PCD na furação de FMLs de alumínio, carbono e titânio [84].

Brinksmeier e Janssen [85] estudaram a maquinagem de FML compostos por plásticos reforçados com fibra de carbono, titânio e alumínio utilizando uma ferramenta otimizada para o efeito. Os resultados demonstraram tolerâncias inferiores, qualidade do furo superior e menor desgaste da ferramenta. As propriedades contrastantes do material apresentam um desafio superior em relação à já difícil área dos compósitos no que ao fabrico de ferramentas diz respeito. No entanto, existem atualmente soluções adaptadas para este tipo de compósito híbrido, onde na Figura 3.15 é possível ver um exemplo. Ainda dentro deste tema, a empresa Macal [86] desenvolveu uma broca para furação em seco de híbridos de compósitos à base de fibra de carbono/metal onde procuraram otimizar a remoção do calor gerado e diminuir a diferença de diâmetros nos furos dos vários materiais. O primeiro ponto foi conseguido através de uma geometria que permite a utilização de velocidades de corte mais baixas e velocidades de avanço superiores, que no caso do CFRP é muito contrastante com os parâmetros normalmente utilizados (velocidade de corte elevada e velocidade de avanço baixo) e a utilização de uma técnica denominado *micropecking* que reduz a dimensão da apara e facilita a

sua remoção. Em relação ao segundo ponto, o diâmetro do furo no compósito é geralmente menor e a solução passou pela inclusão de um micro-mandril, que atualmente possui a marca registada *Micro Reamer*, que apenas entra em contacto com o compósito e assim iguala o seu diâmetro ao diâmetro dos metais furados. Esta solução, contudo, não atingiu o objetivo pois passado alguns dias o diâmetro era novamente menor devido à contração das fibras. Apesar disto, esta solução ainda é utilizada pois reduz significativamente a quantidade de rebarbas, aumentando a qualidade final.



Figura 3.15 – Broca para furação de FMLs [87].

3.2. Furação Orbital

A furação orbital apresenta-se como uma alternativa bastante interessante à furação convencional e a outros métodos de furação (ver Figura 3.16). Neste tipo de furação, a ferramenta utilizada é uma fresa, onde vários exemplos são apresentados na Figura 3.17, que através de um percurso helicoidal cria o furo final.

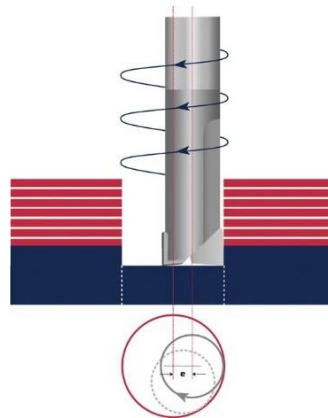


Figura 3.16 – Percurso da ferramenta na furação orbital [88].



Figura 3.17 – Fresas de topo plano para compósitos [89].

Esta operação, quando comparada com a furação convencional apresenta bastantes vantagens. O avanço helicoidal permite o corte de material no centro de furo, ao invés da extrusão de material verificada pelo indentador da broca, reduzindo a força axial e com isso diminuindo o risco de delaminação, Figura 3.18.

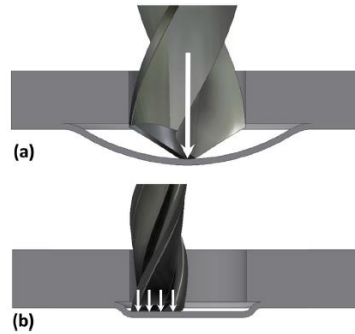


Figura 3.18 – Esforço na camada exterior do material para: (a) furação convencional e (b) furação orbital [90].

A furação orbital permite, também, a obtenção de furos de vários diâmetros com a mesma ferramenta, reduzindo os tempos de produção e permitindo realizar acabamentos, caso necessário, com a mesma ferramenta. Com a furação orbital é possível corrigir o diâmetro da hélice para compensar a crescente imprecisão que advém do desgaste da ferramenta, assim como erros que se possam verificar durante o processo. Devido ao diâmetro menor da ferramenta quando comparado com o diâmetro do furo, a remoção da aparé é facilitada e, pelo mesmo motivo, a dissipação de calor é superior quando comparada com a furação convencional [90]. As desvantagens deste processo atualmente são a produtividade menor devido ao tempo de maquinagem superior e as suas características de maquinagem (maquinagem excêntrica) tornam este processo mais exigente na máquina-ferramenta tendo esta que ter uma boa rigidez [91]. O que foi referido até este ponto é evidenciado por Voss *et al.* [92] que realizaram uma comparação entre a furação convencional e a furação orbital. Os autores destacam forças axiais três vezes inferiores em relação à furação convencional, o que é ótimo do ponto de vista da redução da delaminação, assim como um espaço de tempo após o desgaste inicial onde as forças de corte são estáveis durante a vida da ferramenta. Em contrapartida, os autores destacam o tempo de corte superior em cerca de 200% quando comparado com o método convencional.

Wang *et al.* [93] estudaram a influência dos parâmetros de corte em CFRP nos esforços de corte, desgaste da ferramenta e acabamento dos furos. É verificado que a velocidade de avanço e a profundidade de corte são os parâmetros que mais influenciam os esforços de corte, cujos valores máximos se verificam na direção axial, sendo a variação da velocidade de rotação da ferramenta o parâmetro menos significativo. O desgaste da ferramenta leva a um aumento dos esforços de corte e a uma diminuição da qualidade do furo, mas os autores salientam o efeito reduzido que este tem na rugosidade superficial e na ovalização do furo, que apresentam tendências crescentes muito ligeiras. Os resultados vão de encontro a uma investigação anterior levada a cabo pelos mesmos autores [94]. Com base neste trabalho, novamente Wang *et al.* [95] procuraram a otimização dos parâmetros de corte. Para tal os autores investigaram a melhor combinação que resultaria num aumento da eficiência de corte otimizando, individualmente, as forças resultantes, o esforço axial e a delaminação. No final, os autores propõem um conjunto

de parâmetros que asseguram um bom compromisso entre todos, realizando uma otimização multiobjetivo.

Estudos na furação orbital de CFRP foram realizados também por Sadek *et al.* [96], que, no que concerne aos parâmetros de corte, apresenta resultados de acordo com [93] e [94]. A parte mais interessante deste estudo focou-se na temperatura de corte. A existência de folga entre a ferramenta e o furo a realizar permite uma dissipação superior de calor quando comparado com a furação convencional. O autor aponta reduções de aproximadamente 60% na temperatura de corte e isto deve-se ao coeficiente de convecção bastante superior devido à folga existente e à formação de vórtices de Taylor entre as superfícies da peça e da ferramenta. Este fenómeno pode ser visto na Figura 3.19. Ainda dentro do tema da temperatura durante o processo, uma abordagem muito interessante foi realizada por Ishida *et al.* [97] que investigaram o efeito da utilização de ultrassons para assistir o processo e na utilização de nitrogénio líquido para que a ferramenta inicie o processo a uma temperatura muito baixa. Foi verificado que estas condições são insignificantes no desgaste da ferramenta, mas a utilização de ultrassons levou a um decréscimo das forças de corte que aliado à baixa temperatura inicial da ferramenta levou a um aumento da precisão devido ao maior espaço de tempo necessário para atingir a temperatura de transição da matriz.

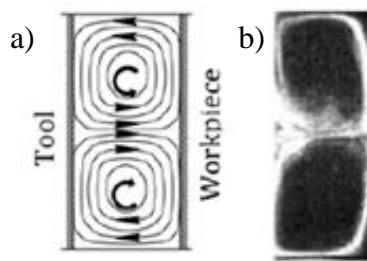


Figura 3.19 – a) Representação esquemática dos vórtices de Taylor entre a ferramenta e a peça; b) vórtices de Taylor durante a furação orbital [96].

Zhou *et al.* [98] abordaram a furação de FMLs compostos por laminados de fibra carbono e titânio e verificaram um aumento de precisão na camada de carbono com o aumento da relação entre o diâmetro do furo e da ferramenta. Os autores notam que o diâmetro na camada de CFRP é sempre superior ao da camada de titânio e no artigo é ainda evidenciada a sensibilidade do compósito de carbono no que concerne à velocidade de rotação da ferramenta assim como uma diminuição do diâmetro obtido quer no compósito quer no titânio devido ao desgaste da ferramenta.

3.2.1. Cinemática da Furação Orbital

A furação orbital apresenta-se como um método de furação mais flexível na obtenção de furos, podendo obter-se vários diâmetros com uma única ferramenta. Esta flexibilidade deve-se ao maior número de parâmetros controláveis. Conhecimentos da cinemática do processo são essenciais para uma maquinagem correta e para poder abordar este tema com espírito crítico.

Devido ao percurso tridimensional da ferramenta, a cinemática do processo pode ser descrita através da decomposição do seu percurso helicoidal. Assim a velocidade de avanço helicoidal, v_{fh} , pode ser decomposta numa velocidade de avanço axial da hélice, v_{fha} , expressão (3.8) e numa velocidade de avanço tangencial da hélice, v_{fht} , expressão (3.10), que descrevem o movimento axial de profundidade e o movimento circular no plano, respetivamente. A velocidade tangencial da hélice corresponde à velocidade do ponto central da ferramenta em relação ao diâmetro da hélice, D_h , e pode ser relacionada com a velocidade tangencial em relação ao diâmetro do furo, v_{ft} , apresentada na expressão (3.9) [90]. A velocidade tangencial, v_{ft} , corresponde à velocidade linear na extremidade da ferramenta. Uma esquematização é apresentada na Figura 3.20.

$$v_{fha} = f_{za} \cdot z \cdot N \text{ [mm/min]} \quad (3.8)$$

$$v_{ft} = f_{zt} \cdot z \cdot N \text{ [mm/min]} \quad (3.9)$$

$$v_{fht} = \frac{v_{ft} D_h}{D_f} \text{ [mm/min]} \quad (3.10)$$

Onde:

- f_{za} – Avanço axial por dente (mm/dente)
- f_{zt} – Avanço tangencial por dente (mm/dente)
- D_f – Diâmetro do furo (mm)
- D_h – Diâmetro da hélice (mm)
- z – Número de dentes da ferramenta
- N – Velocidade de rotação (RPM)

E tratando-se de uma decomposição de vetores estes parâmetros relacionam-se com a velocidade de avanço helicoidal através da expressão (3.11) [90]:

$$v_{fh} = \sqrt{v_{fha}^2 + v_{fht}^2} \text{ [mm/min]} \quad (3.11)$$

O avanço axial por rotação orbital, também conhecido por *pitch*, é dependente das velocidades de avanço helicoidais tangencial e axial e pode ser expressa partindo do ângulo de hélice, expressão (3.12) [90]:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_{fha}}{v_{fht}} \quad (3.12)$$

Tal torna possível o cálculo do avanço axial máximo, através da expressão (3.13) [90]:

$$a_p^* = \tan \alpha \pi \cdot D_h = \frac{f_{za} \cdot \pi \cdot D_h}{f_{zt}} \quad [mm/rot. orbital] \quad (3.13)$$

A Figura 3.21 apresenta uma esquematização para a determinação este valor.

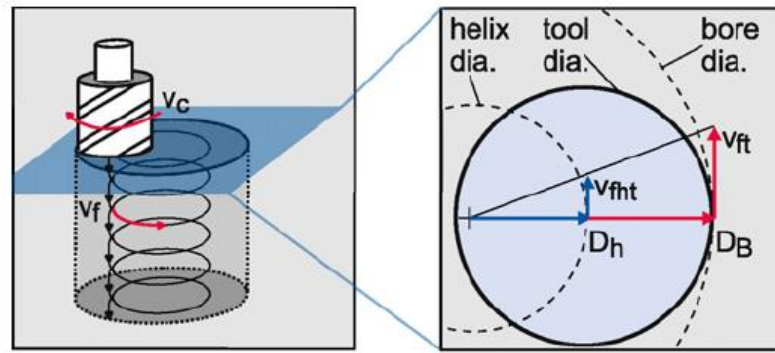


Figura 3.20 – Esquema para a determinação de velocidade tangencial da hélice [91].

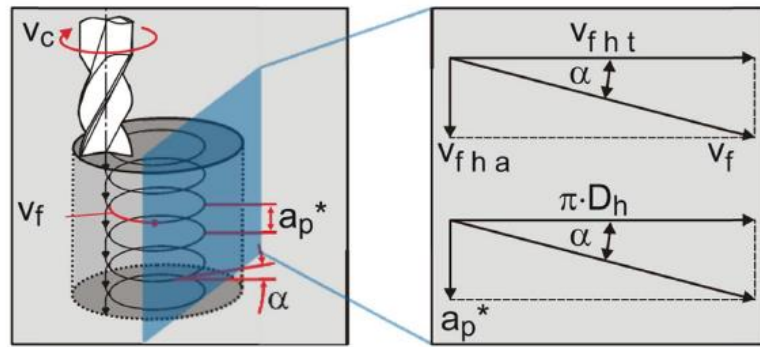


Figura 3.21 – Esquema para a determinação do avanço axial [91].

A excentricidade da ferramenta é uma característica deste processo, apresentando importância no furo obtido e é dada pela expressão (3.14) [90]:

$$e = \frac{D_f - D}{2} \quad (3.14)$$

Se o diâmetro da ferramenta, D , for muito elevado as arestas de corte não passam no centro do furo, deixando uma pequena elevação no final da operação. No caso oposto, o material no centro não é removido, deixando um núcleo de material nessa zona. Estes fenômenos são observáveis na Figura 3.22.

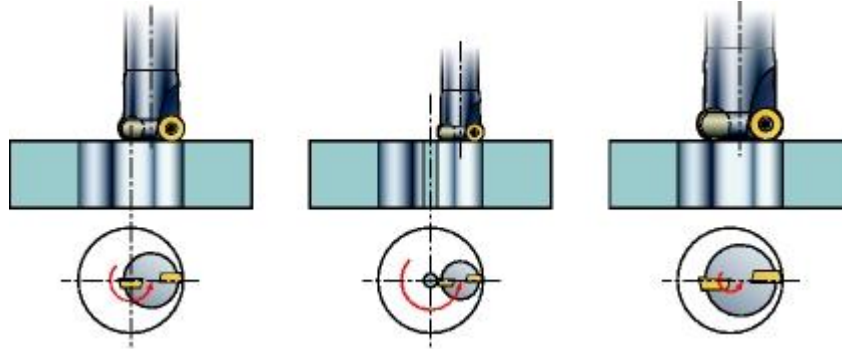


Figura 3.22 – Efeito da excentricidade da ferramenta na furação orbital [80].

Para a realização da furação orbital é necessária a introdução de parâmetros que caracterizem por completo o percurso da ferramenta. Estes parâmetros são a velocidade de corte (V_c), o avanço por dente na direção tangencial (f_{zt}) e a profundidade de corte por rotação orbital, a_p . Este último pode tomar qualquer valor desde que não ultrapasse o valor máximo a_p^* . A Sandvik recomenda que o avanço por rotação orbital não exceda a profundidade de corte máxima da ferramenta [99]. O avanço por dente tangencial pode ser obtido através de catálogos de fabricantes de ferramentas, na seção das fresas, assim como a velocidade de corte. Mencione-se que a última, tal como a velocidade de corte na furação convencional, é dependente do diâmetro da ferramenta, D , e da frequência de rotação, N , pelo que este valor é calculado também a partir da expressão (3.1).

Com estes parâmetros e com o número de dentes da fresa, z , é possível determinar a frequência de rotação orbital através da expressão (3.15) [93]:

$$n_0 = \frac{f_{zt} \cdot z \cdot N}{2\pi(D_f - D)} \text{ [RPM]}, \quad (3.15)$$

que em conjunto com o avanço por rotação orbital permite, alternativamente, exprimir a velocidade de avanço axial através da expressão (3.16) [93]:

$$f_a = a_p \cdot n_0 \text{ [mm/min]} \quad (3.16)$$

3.2.2. Geometria da apara

Podendo ser decomposta em dois movimentos distintos, a furação orbital é considerada uma combinação do processo de fresagem com o processo de furação. Este processo contém

simultaneamente um corte periférico descontínuo, típico da fresagem e corte frontal, típico da furação. A geometria da apara é influenciada por este facto, podendo ser considerada ela também uma combinação das aparas de cada tipo de processo, Figura 3.23.

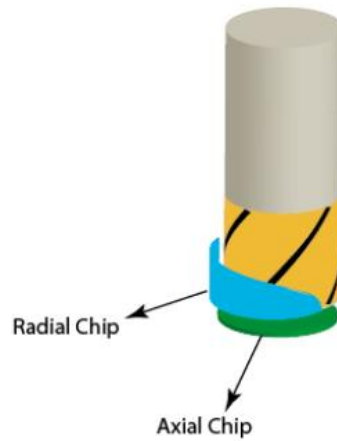


Figura 3.23 – Aparas resultantes de cada tipo de movimento [100].

Uma abordagem teórica em relação à apara resultante deste tipo de processo foi realizada por Brinksmeier *et al.* [101], concluindo que a relação entre o corte periférico e o corte axial, ou por outras palavras, a relação entre fresagem e furação é apenas dependente do diâmetro do furo e da ferramenta:

$$G = \left(\frac{D_f - D}{D} \right)^2 \quad (3.17)$$

Deste modo, quando o diâmetro da ferramenta tende a igualar o diâmetro do furo a expressão (3.17) toma o valor nulo, indicando que o corte é exclusivamente frontal, típico da furação.

Analisando cada tipo de corte separadamente, no que toca ao corte radial a espessura da apara vai crescendo com a rotação da ferramenta, atingindo um máximo após 90° e invertendo a tendência a partir desse ponto onde a espessura da apara vai diminuindo, atingindo o valor nulo após outros 90°. Durante este intervalo a ferramenta avança no material atingindo o valor da profundidade de corte máximo, a_p^* , ao fim de 180°. Isto leva a um corte descontínuo do material. Quanto ao corte axial, a secção da apara não deformada é constante ao longo da rotação da ferramenta, de valor igual ao avanço axial por dente, f_{za} , o que permite a remoção contínua de material. A geometria da apara, visível na Figura 3.24, é maioritariamente dependente do diâmetro do furo e da ferramenta, que influenciam a relação fresagem/furação do processo, mas sofre influência também dos avanços por dente helicoidais axial e tangencial e na profundidade de corte resultante, como demonstrado por Denkena *et al.* [91]. A Figura 3.25 resume o que aqui foi descrito, mostrando a evolução da apara com a rotação da ferramenta.

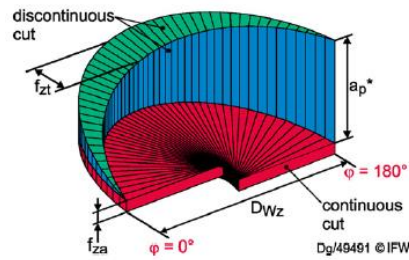


Figura 3.24 – Geometria da apara não deformada [91].

Refira-se, no entanto, que a geometria da apara apresentada acima é aplicável a materiais com alguma ductilidade, como alguns metais, Figura 3.26. que apresentam deformação considerável até à separação do material. No caso da maquinagem de CFRP, é comum referir que a ferramenta “estilhaça” o material ao invés de o deformar. Isto resulta numa apara descontínua de dimensões muito reduzidas, sendo uma espécie de poeira, Figura 3.27.

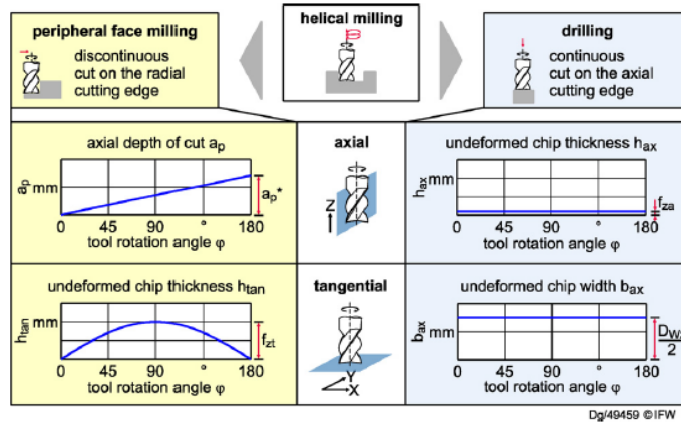


Figura 3.25 – Evolução da apara com a rotação da ferramenta [91].

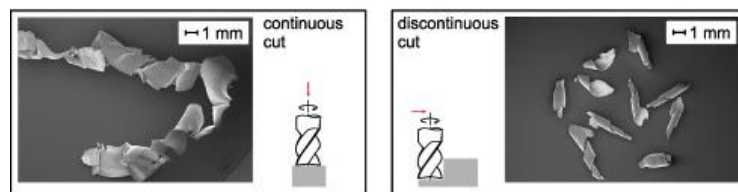


Figura 3.26 – Aparas resultantes da furação orbital de titânio. Adaptado de [91].

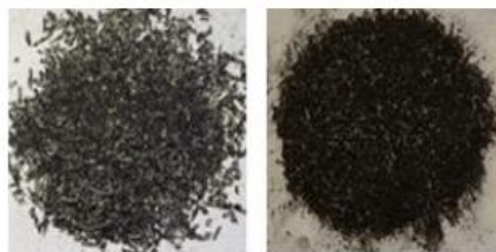


Figura 3.27 – Aparas resultantes da maquinagem de CFRP [102].

4. Trabalho experimental

Como resultado do interesse crescente nos compósitos híbridos Aço/CFRP, em especial na indústria automóvel [56, 59, 64, 65, 103], e fruto da quantidade muito reduzida de informação acerca da maquinagem desta combinação de materiais, o objetivo da componente experimental deste estudo foi o de investigar a maquinagem deste material híbrido e verificar a influência dos parâmetros de corte na qualidade obtida em furos realizados pelo processo de furação orbital. Adicionalmente, também foi realizada uma comparação com furos obtidos através de furação convencional. Neste capítulo serão descritos em detalhe os materiais utilizados para a obtenção do compósito híbrido e o seu fabrico, as ferramentas utilizadas, os parâmetros de corte selecionados, o plano de ensaios, o equipamento para a realização dos furos e medição dos esforços de corte e o equipamento para análises dos ensaios.

4.1. Compósito Híbrido Aço/CFRP

4.1.1. Materiais

O material a utilizar será similar ao utilizado em [51], onde o autor abordou o fabrico de híbridos Aço/CFRP. Deste modo o aço a utilizar é o aço SSAB Docol 600DP, que apresenta como principais características boa soldabilidade e boa capacidade de conformação plástica, sendo atualmente utilizado na indústria automóvel. As suas propriedades são apresentadas na Tabela 4.1 e a ficha do fornecedor pode ser consultada no Anexo B.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas e composição química (mássica) do aço Docol 600DP.

<i>Propriedades - SSAB Docol 600 DP</i>	
<i>Espessura [mm]</i>	1
<i>Tensão de cedência $\sigma_{p0.2}$ [MPa]</i>	350-450
<i>Tensão de rotura σ_m [MPa]</i>	600-700
<i>Extensão após rotura A_{80} [min %]</i>	16
<i>C [max %]</i>	0,12
<i>Si [max %]</i>	0,40
<i>Mn [max %]</i>	1,00
<i>P [max %]</i>	0,025
<i>S [max %]</i>	0,010
<i>Al [max %]</i>	0,015
<i>Nb+Ti [max %]</i>	0,10

No que toca ao compósito de fibras de carbono, este foi obtido utilizando dois pré-impregnados. O primeiro é oriundo da *Mitsubishi Rayon* com a designação TR3523 361 GMP, cuja ficha técnica encontra-se no Anexo C do presente trabalho. As fibras de carbono utilizadas são obtidas através de um precursor de PAN, designadas por TR 30S 3L, enquanto que a resina é do tipo epóxico com a designação PYROFIL #360 / #361. Este é um pré-impregnado de cura

rápida, indicado para o processo de moldação por compressão, com um tempo de cura aconselhado de 5 minutos à temperatura de 140°C e pressão entre os 3 e 10 MPa, embora outras alternativas sejam indicadas e que podem ser consultadas na ficha técnica da resina, Anexo D. O segundo pré-impregnado provém da *Nanopith*, cuja resina epóxido de nome ER 150_30 B2 é descrita pelo fornecedor como sendo bastante flexível quanto ao tipo de fibras que pode impregnar, à sua reatividade e à sua aderência (*tack*). Os tempos de cura aconselhados variam entre os 30 e os 60 minutos a temperaturas que vão desde os 125°C aos 150°C. Os dados deste pré-impregnado podem ser consultados no Anexo E.

4.1.2. Fabrico

O fabrico do compósito híbrido foi realizado de acordo com o processo que resultou nas melhores propriedades mecânicas em [51]. Assim sendo, tiras de aço com 350*40 mm² foram sujeitas a um tratamento superficial de granalhagem com partículas de alumina (Al₂O₃) na granalhadora *DE LAURENTIIS 70S GM*, Figura 4.1, por forma a promover um nível de adesão superior entre o metal e o compósito.



Figura 4.1 – Granalhadora DE LAURENTIIS 70S GM.

Após o tratamento superficial (granalhagem e utilização de desengordurante para limpar as superfícies), foram empilhadas 3 camadas de pré-impregnado com a sequência [+45/-45] sobre o metal e seguiu-se o processo de cura numa prensa hidráulica de pratos quentes INTOCO®, Figura 4.2, para consolidar o pré-impregnado. Para o pré-impregnado da *Mitsubishi*, o ciclo consistiu numa rampa de aquecimento de 30 minutos até os 125°C, com estágio de 15 minutos nesta temperatura. Após este estágio, os provetes foram arrefecidos a ar até à temperatura ambiente. Quanto ao pré-impregnado da *Nanopith*, o ciclo de cura consistiu numa rampa de aquecimento de, também, 30 minutos até 135°C, estágio de 60 minutos e arrefecimento até à temperatura ambiente. O resultado final são tiras com uma espessura final de 1,65 mm e com o aspeto apresentado na Figura 4.3, que permitem uma realização mais rápida dos furos. Da figura verifica-se alguma encurvadura, resultante das propriedades térmicas distintas de cada material

e à assimetria do produto final em termos de colocação das várias camadas. No entanto, este facto não influenciou o processo de furação, pois foi desenvolvido um dispositivo de fixação específico para estes ensaios. Para ambos os pré-impregnados a totalidade ciclo foi realizado a uma pressão de 10 bar (1 MPa).



Figura 4.2 – Prensa hidráulica de pratos quentes INTOCO®.



Figura 4.3 – Compósito híbrido utilizado e marcado para a furação.

4.2. Ferramentas e Máquina CNC

Determinou-se que para a componente experimental do trabalho o diâmetro dos furos fosse de 10 mm. A decisão recaiu neste valor por ser bastante utilizado na indústria. Para o efeito foram utilizadas quatro ferramentas: três fresas, duas adaptadas para maquinagem de aço e uma para maquinagem de CFRP, com diâmetro de 6 mm e uma broca com diâmetro¹ de 6 mm.

¹ Para uma melhor comparação, uma broca de 10 mm deveria ter sido utilizada por forma a obter furos similares. No entanto, um problema técnico na entrega do material e a falta de tempo para corrigir esse problema impediram a sua utilização pelo que se recorreu a uma broca igual, mas com o diâmetro mencionado acima.

Durante a seleção do diâmetro do furo a realizar pelas fresas foi necessário ter em conta a excentricidade do processo pelas razões mencionadas na secção 3.2.1. Foi verificado no decorrer da revisão bibliográfica a utilização de fresas com o mesmo diâmetro para realizar furos com diâmetro igual ao pretendido [93-95, 104] pelo que se concluiu que a remoção de material para obtenção do furo será adequada. As ferramentas utilizadas para a realização do plano de ensaios, que se discutirá adiante, são apresentadas na Figura 4.4 e Figura 4.5. Ambas são fabricadas em metal duro e possuem 2 arestas de corte, diferindo no revestimento que para a ferramenta adaptada para maquinar laminados de carbono, é de diamante e para a ferramenta de maquinar aço é de TiAlN. Adicionalmente ao diâmetro, outras dimensões de interesse das ferramentas estão apresentadas na Tabela 4.2.



Figura 4.4 – Fresa para maquinagem de CFRP (fornecida pela Palbit, s.a).



Figura 4.5 – Fresa para maquinagem de aço (fornecida pela Palbit, s.a).

Tabela 4.2 – Dimensões das fresas utilizadas.

	<i>Diâmetro da haste (mm)</i>	<i>Diâmetro do corpo (mm)</i>	<i>Comprimento do corpo (mm)</i>	<i>Comprimento total (mm)</i>	<i>Ângulo de hélice (°)</i>
<i>Fresa para CFRP</i>	6	6	18	50	25
<i>Fresa para aço</i>	6	6	10	57	30

Na Figura 4.6, apresenta-se outra fresa proposta para maquinar aço, que foi utilizada para a realização dos ensaios preliminares.



Figura 4.6 – Ferramenta recomendada para maquinagem de aço utilizada nos testes preliminares (fornecida pela Palbit, s.a).

Em relação à broca, Figura 4.7, esta é de dentes retos e possui 3 arestas de corte. É fabricada em metal duro não revestido. Para além do diâmetro de 6 mm, as dimensões do corpo e da haste são de 50 e 100 mm respetivamente. Esta broca foi projetada para maquinar compósitos pelo que será interessante verificar o seu comportamento na furação do material híbrido.



Figura 4.7 – Broca de dentes retos (fornecida pela *Palbit*, s.a).

As operações de maquinagem foram realizadas no centro de maquinagem de cinco eixos DMU 60 eVo DECKEL MAHO da DMG MORI existente no INEGI, Figura 4.8, cujas principais características apontadas pelo fabricante se apresentam na

Tabela 4.3. O código CNC foi feito recorrendo ao software *MasterCAM*. A fixação da ferramenta ao cone é feita pelo meio de pinças do tipo ER, Figura 4.9. Neste trabalho foram utilizadas pinças ER32. O cone onde a pinça com a ferramenta é colocada é do tipo HSK, neste caso HSK-63, e é fixo no carrocel da máquina por sistema pneumático.



Figura 4.8 – DMU 60 eVo DECKEL MAHO [105].



Figura 4.9 – Pinças de fixação do tipo ER.

Tabela 4.3 – Características da máquina CNC DMU 60 eVo DECKEL MAHO. Adaptado de [105].

Resolução dos eixos X, Y e Z de 0.01 μm
Eixos X,Y ambos arrançados como pórtico
Velocidade de rotação do <i>spindle</i> variável entre 20 e 18000 RPM
Peso de aproximadamente 9600 kg
Carga máxima na mesa de trabalho de 400kg
Área de trabalho de 600 x 500 x 500 mm
Potência máxima do <i>spindle</i> de 25kW
Binário máximo do <i>spindle</i> de 80 N.m
Capacidade para 30 ferramentas
Nível de pressão sonora máximo de 78 dB

4.3. Aquisição de dados

Tratando-se de dois materiais muito distintos que, quando maquinados, geram esforços de corte com diferentes magnitudes, foi de interesse realizar a medição dos esforços durante as operações de maquinagem. Para a medição dos esforços recorreu-se a uma célula de carga, que não é mais do que um transdutor de força que converte um fenómeno físico num sinal elétrico. A célula de carga utilizada para a medição dos esforços de corte foi o modelo 9272 da KISTLER, Figura 4.10 a), e cuja ficha técnica pode ser consultada no Anexo E. Trata-se de um dinamómetro piezoelétrico capaz de medir esforços nas três direções ortogonais, assim como o binário segundo o eixo vertical.

A célula de carga foi conectada a um amplificador de sinal KISTLER 5070A, Figura 4.10 b), por meio de um cabo do fabricante próprio para o efeito e os dados do amplificador são seguidamente enviados para o computador através do adquiridor de dados *Advantech* USB-4711A, Figura 4.10 c), que permite a visualização gráfica dos esforços em tempo real. No final os dados são guardados para permitir o pós-tratamento dos resultados.



Figura 4.10 – a) célula de carga KISTLER 9272; b) amplificador KISTLER 5070A; c) carta de aquisição de dados *Advantech* USB-4711^a.

4.4. Fixação da Célula de Carga e dos Provetes

Para a utilização da célula de carga ser possível é necessário fixá-la na mesa de trabalho do centro de maquinagem. Devido à sua geometria e dimensões não é possível fixá-la diretamente na mesa de trabalho pelo que uma base para a célula de carga foi utilizada para o efeito. A solução recaiu na base criada por Neto [106].

Com a célula de carga fixa foi necessária a criação, também, de uma forma de fixar os provetes a maquinar. Deste modo foram criadas as placas de fixação apresentadas na Figura 4.11 a) e b), e cujos desenhos técnicos se encontram no Anexo F. Estas apresentam um corte que funciona como uma calha (guia) por forma a que o material não se desloque lateralmente durante a maquinagem. A base inferior é fixa à célula de carga por meio de quatro parafusos M8 embebidos com um binário de aperto de 20 N.m, enquanto que o topo é fixo à base por meio de quatro parafusos M6 com um binário de aperto de 6 N.m, que comprime o material e restringe o seu movimento. O conjunto completo pode ser observado na Figura 4.12. O diâmetro dos furos na placa de fixação é de 11 mm, o que corresponde a uma diferença muito reduzida em relação ao diâmetro de 10 mm dos furos a realizar.

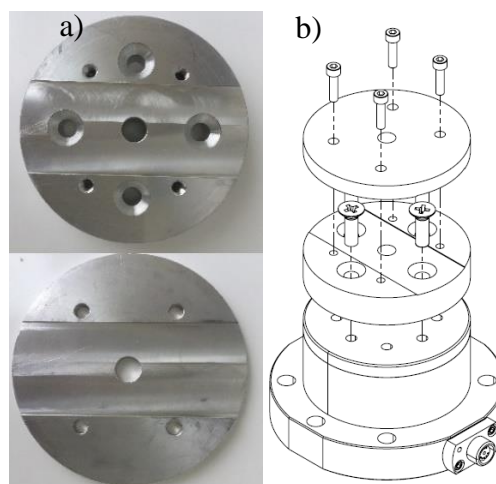


Figura 4.11 – a) peças elaboradas, em liga de alumínio para a fixação dos provetes; b) montagem na célula de carga.

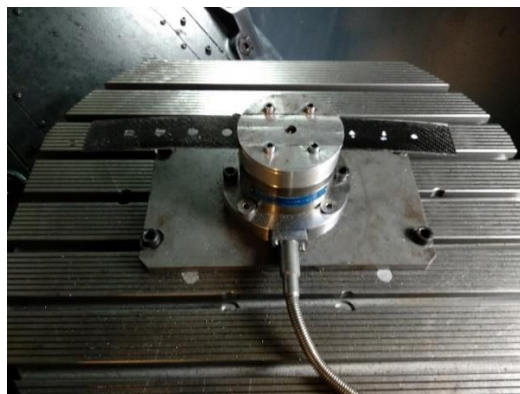


Figura 4.12 – Placas de fixação na célula de carga.

4.5. Seleção dos parâmetros de Corte

4.5.1. Furação Orbital

A seleção dos parâmetros de corte dos ensaios são a parte mais importante do procedimento experimental. As propriedades mecânicas contrastantes dos materiais em questão fazem com que cada um deles tenha exigências diferentes do ponto de vista da sua maquinagem. O aço é um material com alguma ductilidade enquanto que o compósito de carbono é frágil e muito rígido. Este facto torna a seleção dos parâmetros de corte adequados difícil. Uma solução seria a utilização de parâmetros adequados para cada material durante o processo, semelhante aos utilizados em [98] e [107], mas fruto da espessura muito reduzida do material a ensaiar esta solução é inviável e por este motivo os materiais serão maquinados com os mesmos parâmetros de corte. Recorde-se que os parâmetros de corte necessários para a furação orbital são a velocidade de corte (V_c), o avanço tangencial por dente (f_{zt}) e o avanço por rotação orbital ou axial (a_p). Foi mencionado anteriormente que os dois primeiros parâmetros podem ser obtidos através de catálogos de ferramentas de fresagem enquanto que o último não é especificado diretamente, mas sabe-se que o limite imposto é o valor máximo da profundidade de corte da ferramenta. Velocidades de corte para CFRP e aço de elevada resistência aconselhadas por vários fabricantes (para ferramentas de metal duro) são apresentadas na Tabela 4.4. Para além dos valores dos catálogos foi realizado também um resumo dos parâmetros de corte utilizados em diversas investigações de furação orbital, apresentados na Tabela 4.5, enquanto que na

Tabela 4.6 são apresentados valores utilizados na fresagem de CFRP em duas investigações. Em adição a estes valores, o fabricante das ferramentas utilizadas no trabalho experimental contém uma aplicação que, em função do material e da ferramenta, aconselha os parâmetros a utilizar. No entanto, são apenas indicados os parâmetros para o material para o qual a ferramenta foi pensada, não referindo parâmetros para o outro material. Os valores são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.4 – Parâmetros de gerais corte recomendados por vários fabricantes para a fresagem de CFRP e aço de elevada resistência.

<i>Fornecedor</i>	<i>Velocidade de corte recomendada (m/min)</i>		<i>Avanço por dente recomendado (mm/dente)</i>	
	<i>CFRP</i>	<i>Aço de elevada resistência</i>	<i>CFRP</i>	<i>Aço de elevada resistência</i>
<i>Palbit</i>	-	210-300	-	0,03-0,07
<i>Cerin</i>	120-180	100-200	0,026-1,6	0,006-0,011
<i>Mitsubishi Tools</i>	200	37-188	0,01-0,03	0,024-0,05
<i>Sandvik</i>	100-280	100-200	0,03-0,08	0,02-0,1
<i>Hufschmied</i>	150-200	-	0,02-0,08	-
<i>SSAB</i>	-	160-190	-	-
<i>K2</i>	-	250	-	0,04-0,08

Tabela 4.5 - Parâmetros de corte utilizados em várias investigações de furação orbital de CFRP e híbridos com este material.

<i>Referência</i>	<i>Ferramenta/Revestimento</i>	<i>Z</i>	<i>V_c (m/min)</i>	<i>Avanço por dente tangencial (mm/dente)</i>	<i>Avanço axial (mm/rotação orbital)</i>
[90]	<i>Metal Duro/Diamante</i>	3	160	0,08	0,8
	<i>Metal Duro</i>	4	57	0,01-0,06	0,15-0,2
	<i>Metal Duro</i>	2	100	0,151-0,452	0,166-1,5
	<i>Metal Duro</i>	4	314-440	0,034-0,177	0,006-0,15
	<i>Metal Duro</i>	4	75-151	0,02-0,04	0,1-0,25
	<i>Metal Duro</i>	4	120-319	0,057-0,075	1-3
[91]	<i>Metal Duro/TiAl</i>	3	40	0,04-0,12	0,1-1,88
[93]	<i>Metal Duro/TiAl</i>	4	75-95	0,02-0,06	0,1-0,2
[94]	<i>Metal Duro/TiAl</i>	4	57-113	0,03-0,06	0,1-0,25
[95]	<i>Metal Duro/TiAl</i>	4	75-113	0,02-0,06	0,1-0,2
[97]	<i>Metal Duro</i>	2	50	0,0168	1
[98]	<i>Metal Duro/TiAlN</i>	4	226-282	0,063-0,078	0,4-0,5

Tabela 4.6 – Parâmetros de corte utilizados em várias investigações na fresagem de CFRP.

<i>Referência</i>	<i>Ferramenta/Revestimento</i>	<i>Z</i>	<i>Velocidade de corte (m/min)</i>	<i>Avanço por dente (mm/dente)</i>	<i>Profundidade de corte (mm)</i>
[75]	<i>Metal Duro/PCD</i>	2	38-150	0,025-0,055	2,5
[108]	<i>Metal Duro/ Sem revestimento e com TiAl</i>	2-4	119-182	0,03-0,06	1

Tabela 4.7 – Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante.

<i>Ferramenta</i>	<i>Velocidade de corte recomendada (m/min)</i>		<i>Avanço por dente recomendado (mm/dente)</i>	
	<i>CFRP</i>	<i>Aço de elevada resistência</i>	<i>CFRP</i>	<i>Aço de elevada resistência</i>
<i>Ferramenta para maquinar CFRP</i>	174-247	-	0,012-0,0143	-
<i>Ferramenta para maquinar aço</i>	-	89-200	-	0,0294-0,044

Devido à diversidade de valores obtidos com as várias referências, testes preliminares foram realizados para auxiliar na seleção dos parâmetros de corte mais adequados. Para este tipo de testes foi de interesse utilizar parâmetros que representem uma gama considerável de valores por forma a evidenciar os efeitos que estes podem ter no resultado final. Caso o intervalo seja reduzido, é muito provável estar-se numa gama em que não se verifiquem diferenças significativas durante os testes, o que pode levar à impossibilidade de tirar conclusões importantes e, em consequência, a uma má seleção dos parâmetros para o plano de ensaios principal. No final, os valores selecionados para o plano de ensaios foram os apresentados na Tabela 4.8

Tabela 4.8 – Parâmetros de corte selecionados.

<i>V_c (m/min)</i>	<i>100</i>	<i>300</i>
<i>Avanço por Dente (mm/dente)</i>	<i>0,01</i>	<i>0,05</i>
<i>Avanço Axial (mm/rotação orbital)</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1</i>

4.5.2. Furação Convencional

Quando se trata de furação convencional os parâmetros de corte são a velocidade de corte (V_c) e o avanço por rotação (f), como mencionado no início da secção 3.1. Sendo esta uma ferramenta pensada para furar compósitos, e sendo o objetivo a realização de uma quantidade muito baixa de furos apenas para estabelecer uma pequena comparação, utilizou-se apenas um conjunto de parâmetros recomendados para CFRP pelo fabricante com valores de 90 m/min para a velocidade de corte e de 0.09 mm/rot, para o avanço por rotação. Embora não utilizada, uma compilação dos parâmetros utilizados em várias investigações pode ser consultada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros de corte na furação de CFRP em várias investigações.

<i>Referência</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Velocidade de corte (m/min)</i>	<i>Avanço (mm/rot)</i>	<i>Tipo(s) de Broca</i>	<i>Material Revestimento</i>
[71]	6	53-102	0,025-0,075	<i>Helicoidal, Brad, Bidiametral helicoidal</i>	---
[73]	5	15,7	0,005	<i>Helicoidal</i>	<i>Metal Duro/Diamante</i>
[74]	12	100	0,05	<i>Helicoidal</i>	<i>Metal Duro</i>
[77]	6	113	0,12	<i>Helicoidal, Bidiametral helicoidal, Bidiametral de dentes direitos</i>	<i>Metal Duro</i>
[78]	4,9	11,5-23	0,03-0,12	<i>Dentes direitos</i>	-----
[80]	4,83	15	0,075	<i>Helicoidal</i>	<i>Metal Duro/AlCrN</i>
[82]	9,53	29,9-89,8	0,02-0,08	<i>Helicoidal</i>	<i>Metal Duro/Diamante</i>
[83]	6,38	30-144	0,08-0,15	<i>Helicoidal</i>	<i>Metal Duro/Diamante</i>
[84]	6,35	40-120	0,05-0,1	<i>Helicoidal</i>	<i>Metal Duro/Sem revestimento, PCD, C7</i>

4.6. Plano de Ensaios

Da Tabela 4.8 observa-se que temos 3 parâmetros de corte e que cada um desses parâmetros pode tomar dois valores. Para se realizarem testes com todas as combinações são necessários $2^3 = 8$ ensaios. Portanto, devido ao reduzido número de ensaios, para obter um fatorial completo, optou-se por esta abordagem. A matriz de ensaios é adotada para os ensaios de furação orbital está descrita na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Matriz de Ensaios.

<i>Experiência</i>	<i>Velocidade do corte (m/min)</i>	<i>Avanço for dente (mm/dente)</i>	<i>Avanço axial (mm/rotação orbital)</i>
<i>1</i>	<i>100</i>	<i>0,05</i>	<i>0,10</i>
<i>2</i>	<i>100</i>	<i>0,01</i>	<i>0,10</i>
<i>3</i>	<i>300</i>	<i>0,05</i>	<i>0,10</i>
<i>4</i>	<i>300</i>	<i>0,01</i>	<i>0,10</i>
<i>5</i>	<i>300</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>
<i>6</i>	<i>300</i>	<i>0,01</i>	<i>0,05</i>
<i>7</i>	<i>100</i>	<i>0,01</i>	<i>0,05</i>
<i>8</i>	<i>100</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>

Esta matriz foi repetida 3 vezes com a ferramenta de CFRP e 3 com a ferramenta para aço, o que resultou num total de 48 furos. Uma ferramenta nova foi utilizada em cada repetição e os ensaios foram realizados por ordens diferentes, descritas na Tabela 4.11, para adicionar alguma aleatoriedade. Todos os furos foram realizados a seco, de acordo com o que foi verificado na maior parte da revisão bibliográfica. O principal motivo prende-se com facto que o líquido de refrigeração pode prejudicar o compósito, entrando nos vazios existentes entre as várias camadas e separando-os devido ao aumento de pressão. Os laminados foram fixos por forma a que o carbono seja furado em primeiro lugar, servindo o aço de placa de apoio. Durante os testes preliminares experimentou-se realizar um furo com a orientação do laminado oposta e o resultado, como se verá adiante, foi desastroso para a ferramenta de CFRP.

Tabela 4.11 – Ordem de execução dos ensaios.

<i>Repetição</i>	<i>Ordem de execução dos ensaios</i>
<i>1</i>	<i>1-2-3-4-5-6-7-8</i>
<i>2</i>	<i>8-7-6-5-4-3-2-1</i>
<i>3</i>	<i>5-4-6-3-7-2-8-1</i>

4.7. Equipamento para análise dos furos realizados

Após a realização dos ensaios consideraram-se como parâmetros de interesse para a análise de resultados o diâmetro, a delaminação e a qualidade geral dos furos. Para a medição dos diâmetros foi utilizado um micrómetro de interiores *Mitutoyo*, Figura 4.13, com uma escala de 8 a 10 mm e uma resolução 0,001 mm e foram realizadas 3 medições por furo em pontos aleatórios.



Figura 4.13 – Micrómetro de interiores.

A delaminação e rebarbas ou outras imperfeições de furação foram avaliadas recorrendo a imagens observadas no microscópio, modelo SZH da *Olympus*, do laboratório de materialografia do INEGI, Figura 4.14, que em conjunto com o software *ImageJ* torna possível o cálculo do fator de delaminação através da expressão (3.3). Este microscópio foi também utilizado para a avaliação do desgaste das ferramentas assim como para a observação da qualidade geral dos furos.



Figura 4.14 – Microscópio *Olympus* SZH.

5. Discussão dos Resultados

5.1. Testes Preliminares

Como referido na secção 4.4.1. a seleção dos parâmetros de corte para a criação do plano de ensaios foi auxiliada através da realização de ensaios preliminares. O objetivo destes testes consistiu em procurar uma gama de valores para criar um plano de ensaios onde seja possível obter resultados que permitam ter, através da sua análise, uma compreensão clara dos efeitos dos vários parâmetros no resultado final. Caso o intervalo seja reduzido existe a probabilidade de se estar numa gama em que não se verifiquem diferenças significativas durante os testes, o que pode levar à impossibilidade de tirar conclusões importantes e em consequência a uma má seleção dos parâmetros para o plano de ensaios propriamente dito.

Para o presente trabalho bastaram 5 ensaios para determinar os parâmetros a usar no plano de ensaios, mas permitiram tirar conclusões iniciais interessantes. Os parâmetros de corte utilizados foram $V_c=300$ m/min, $f_z=0.05$ mm/dente, $a_p=0.1$ mm e duas sequências de furação: CFRP/Aço, como normalmente é maquinado neste tipo de materiais e Aço/CFRP, como investigado por [82] para verificar as diferenças. Um resumo dos ensaios pode ser observado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos ensaios preliminares.

<i>Ensaio</i>	<i>V_c (m/min)</i>	<i>F_z (mm/dente)</i>	<i>a_p (mm)</i>	<i>Recomendação da Ferramenta</i>	<i>Ordem de furação</i>
1	300	0,05	0,1	CFRP	CFRP/Aço
2	300	0,05	0,1	CFRP	CFRP/Aço
3	300	0,05	0,1	CFRP	Aço/CFRP
4	300	0,05	0,1	Aço	CFRP/Aço
5	300	0,05	0,1	Aço	Aço/CFRP

Ficou claro que este conjunto de parâmetros é algo agressivo, em especial para a ferramenta recomendada para CFRP, verificando-se faíscas durante o processo, visíveis na Figura 5.1. Estas faíscas aparecem em maior quantidade durante a transição do CFRP para o aço, demonstrando que a ferramenta tem dificuldade em penetrar este material. Este fenómeno não se verificou com a ferramenta recomendada para a maquinação do aço.

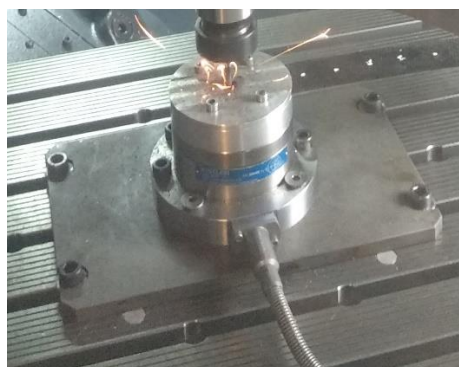


Figura 5.1 – Faíscas durante a furação do provete.

Analisando a qualidade dos furos (Ensaios 1, 2 e 4), observa-se que ambas as ferramentas originaram furos com boa qualidade. No que toca à parte de CFRP, Figura 5.2, não há diferenças a destacar na qualidade dos furos maquinados com uma ou outra ferramenta, quando estas se encontram novas. A boa qualidade e a não existência de delaminação deve-se à conjugação da menor força axial exercida durante a furação orbital com o facto de o fenómeno de *peel-up* ser, normalmente, pouco severo. Quanto à parte do furo no aço, Figura 5.3, ambos exibem, também, qualidade satisfatória. No entanto, observando o interior do furo nota-se que a qualidade é superior quando a ferramenta de aço foi utilizada, algo que já era previsível.

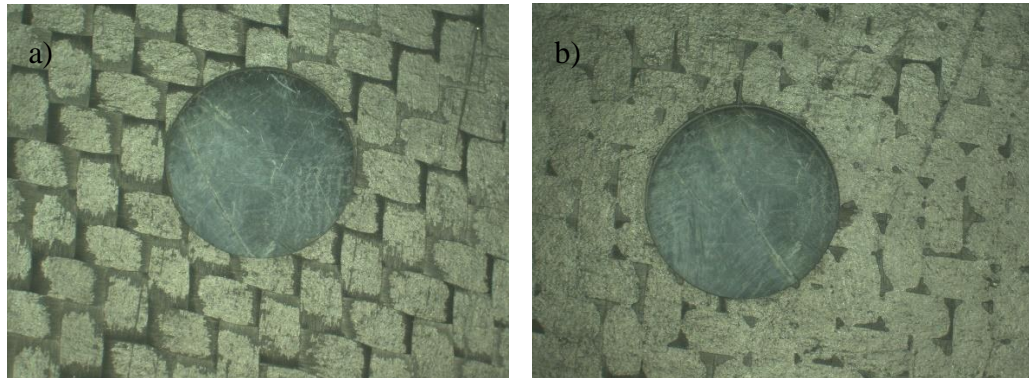


Figura 5.2 – Entrada do furo (zona de CFRP): a) furo realizado com ferramenta para aço; b) furo realizado com a ferramenta para CFRP.

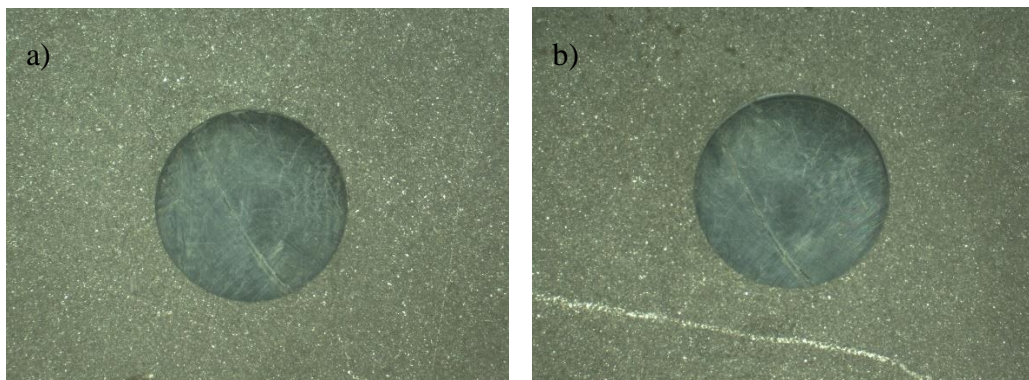


Figura 5.3 – Saída do furo (zona de aço): a) furo realizado com a ferramenta para aço; b) furo realizado com a ferramenta para CFRP.

Abordando agora os furos realizados com a sequência oposta (Ensaios 3 e 5), diferenças muito significativas foram observadas quando comparadas com os furos segundo a ordem “normal”. Tanto a ferramenta para CFRP como a ferramenta para aço produziram faíscas (aparas incandescentes ou em combustão) durante a entrada no material, sendo este fenómeno muito mais severo com a ferramenta para CFRP que libertou uma quantidade muito superior de faíscas, quando comparado com os outros ensaios. O resultado, como se pode observar na Figura 5.4, foi desastroso. Analisando a zona de entrada (neste caso, o aço) é evidente a diferença de uma ferramenta para a outra. A ferramenta para aço, como esperado, apresentou melhores resultados. É notável uma “coroa” à volta do furo. Essa coroa não são rebarbas pelo que poderá significar a existência de alterações na microestrutura do material devido ao aquecimento. Já a ferramenta para CFRP é possível observar rebarbas ao longo do furo.

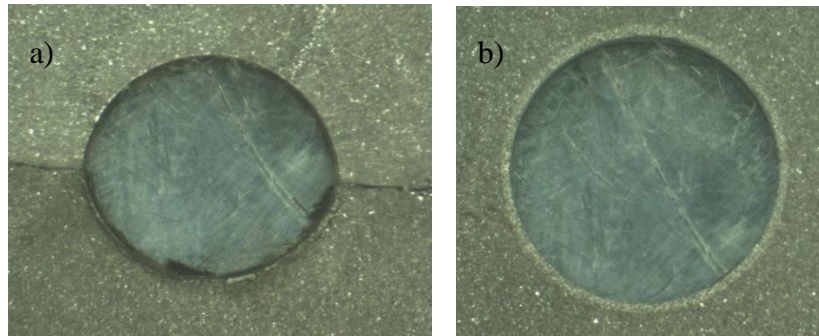


Figura 5.4 – Entrada do furo (zona de aço): a) furo realizado com a ferramenta para CFRP; b) furo realizado com a ferramenta para aço.

Analisando a saída do furo (neste caso, CFRP), verifica-se alguma delaminação nas camadas de CFRP, embora pouco severa realizada pela ferramenta para aço. Isto deve-se ao facto de o compósito ser mais sensível ao fenómeno de *peel-out*, aliado ao facto de a aresta de corte não estar nas melhores condições, Figura 5.5, assim como ao facto de a ferramenta não ser projetada com este tipo de fenómenos em mente. No que toca ao furo realizado com a ferramenta para CFRP, a qualidade é claramente inaceitável, sendo evidente a degradação da matriz (devido à subida de temperatura do provete e da ferramenta durante a maquinagem do aço) e verificando-se também fibras soltas, Figura 5.6 b). Tal se deve à destruição das arestas de corte da ferramenta durante a maquinagem do aço, observável na Figura 5.7. Recorde-se que o resultado visível na figura foi obtido ao final de 3 furos.

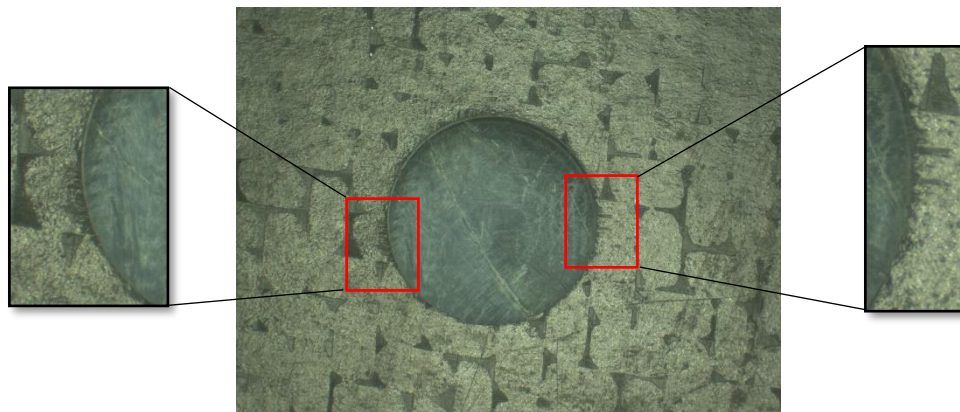


Figura 5.5 – Delaminação após furação com a ordem aço/CFRP (ensaio 5).

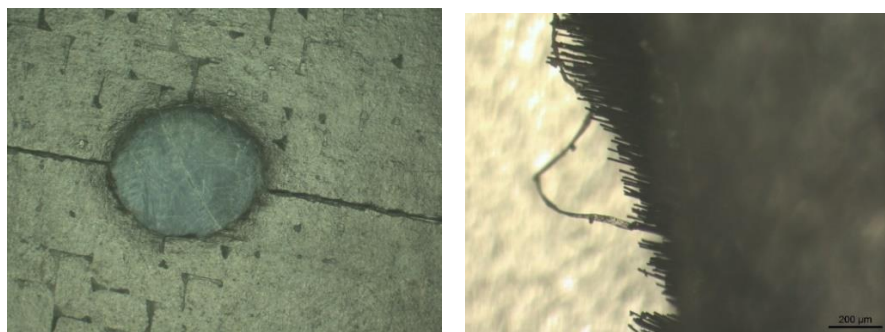


Figura 5.6 – Furo resultante da maquinagem com ordem inversa com ferramenta para CFRP (ensaio 3): a) saída do furo (zona de CFRP) e b) fibras soltas.

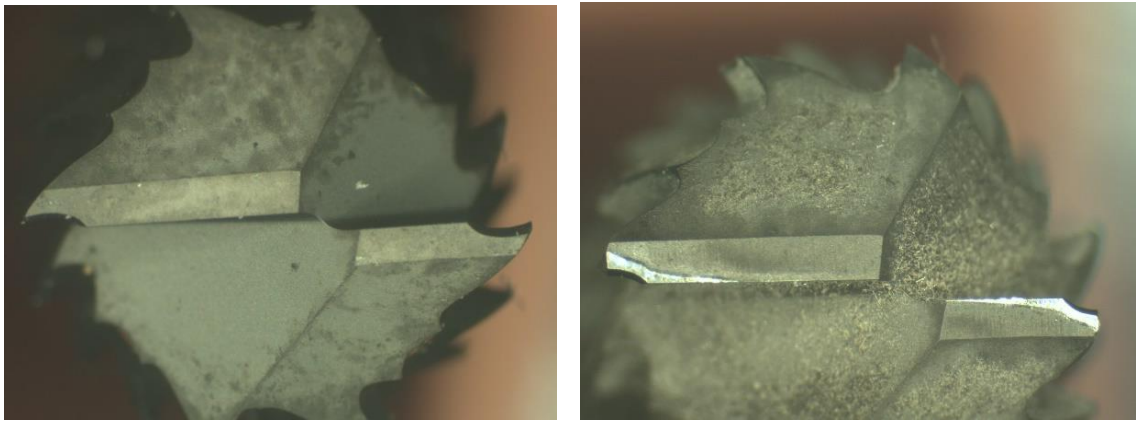


Figura 5.7 – a) ferramenta para CFRP nova e b) a mesma ferramenta após 3 furos.

Comparando o estado de ambas as ferramentas, a ferramenta para maquinar aço sofreu menos danos do que a ferramenta recomendada para maquinar CFRP. Através da Figura 5.8, o desgaste nas arestas de corte é visível, assim como a quebra da extremidade numa das arestas e a ponta deformada plasticamente na outra. Mas, quando comparada com a ferramenta de CFRP, Figura 5.9, é bem evidente a diferença na severidade dos danos em ambas as ferramentas. Isto deixa subentendido que a ferramenta de aço poderá ser mais flexível para maquinar esta combinação de materiais. A ferramenta de CFRP é projetada para um tipo de materiais muito particular que possuem diferenças significativas em vários aspetos quando comparado com outros tipos de materiais, como os metais. Pode-se dizer que esta ferramenta é projetada para fraturar e não deformar, pois a maquinagem de CFRP é associada a um “estilhaçar”, como referido na secção 3.2. Já a ferramenta de aço está pensada para arrancar a aparta através da deformação do material e, devido à sua inércia, consegue “impactar” e “estilhaçar” também o CFRP sem consequências de maior nos furos iniciais.

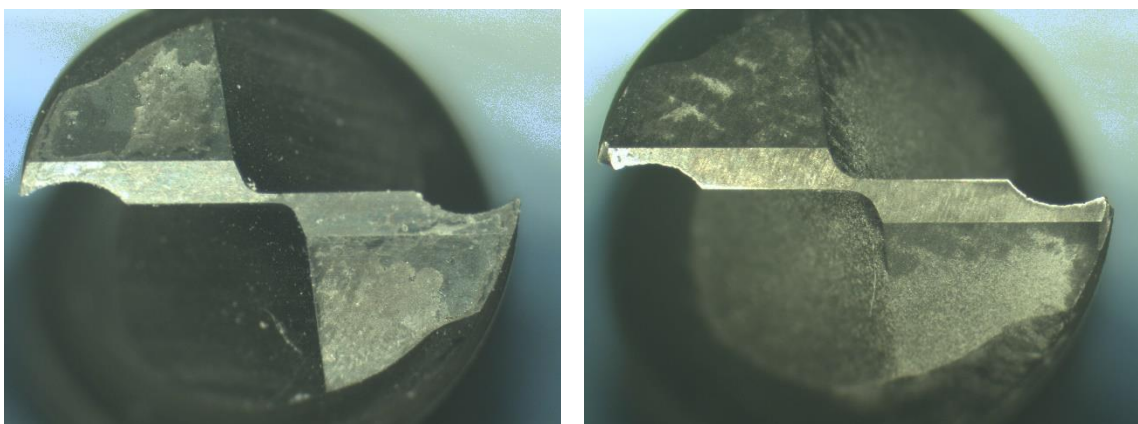


Figura 5.8 – a) ferramenta para aço nova b) mesma ferramenta após 2 furos.

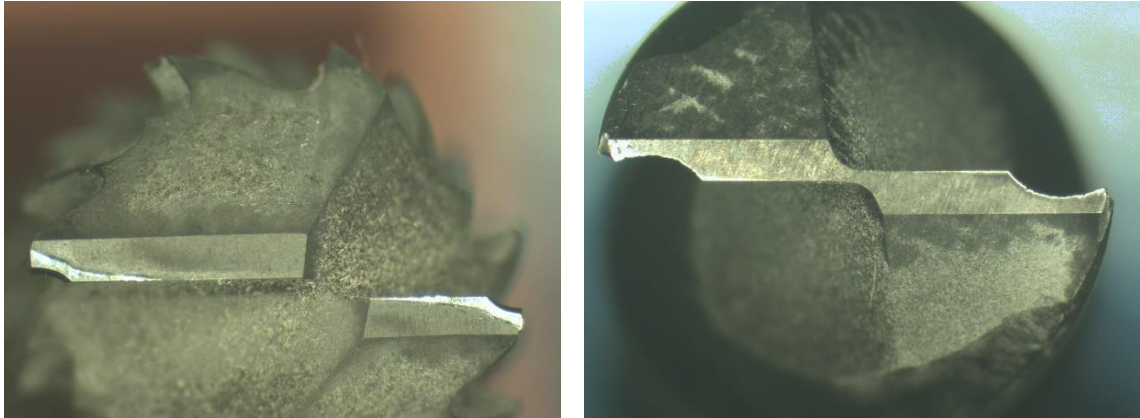


Figura 5.9 – Comparação das ferramentas de corte após os ensaios: a) ferramenta para CFRP e b) ferramenta para aço.

Analisando as forças de corte, como seria de esperar, é claro o material que a ferramenta está a cortar em determinado instante. A Figura 5.10 e Figura 5.11 permitem comparar a evolução dos esforços de corte durante o processo de furação com cada ferramenta. Durante a maquinação do compósito de carbono nota-se um patamar estável dos valores, sendo que o esforço axial é ligeiramente superior na maquinação com a ferramenta para CFRP.

Quando se trata de maquinar aço, nota-se que a evolução das forças é transiente, ou seja, não se verifica um patamar evidente como o verificado em [63], por exemplo. É observável uma diminuição do esforço por volta dos 10 segundos quando a maquinação é efetuada com a ferramenta para aço, em contraste com a ferramenta para CFRP que vai aumentando o esforço até sair do material.

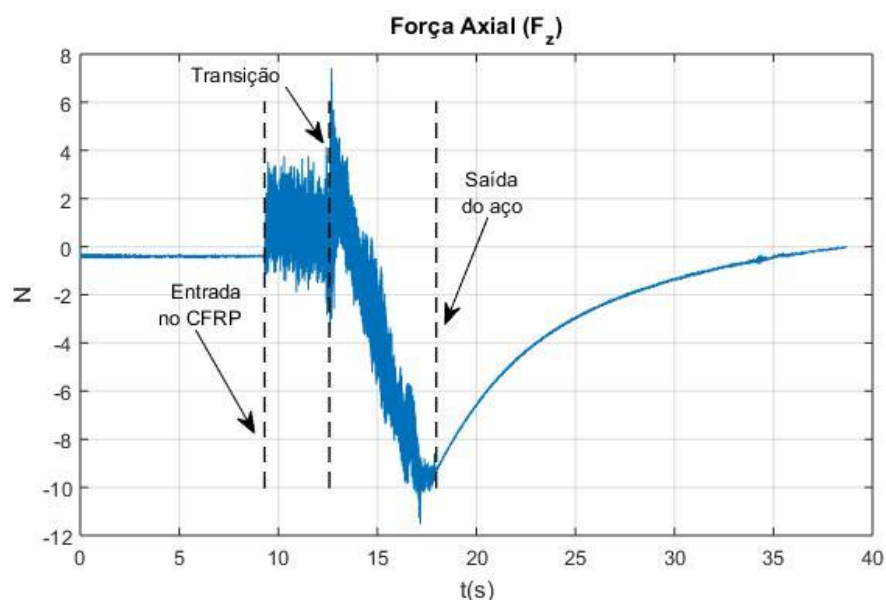


Figura 5.10 – Esforço axial (ensaio 1).

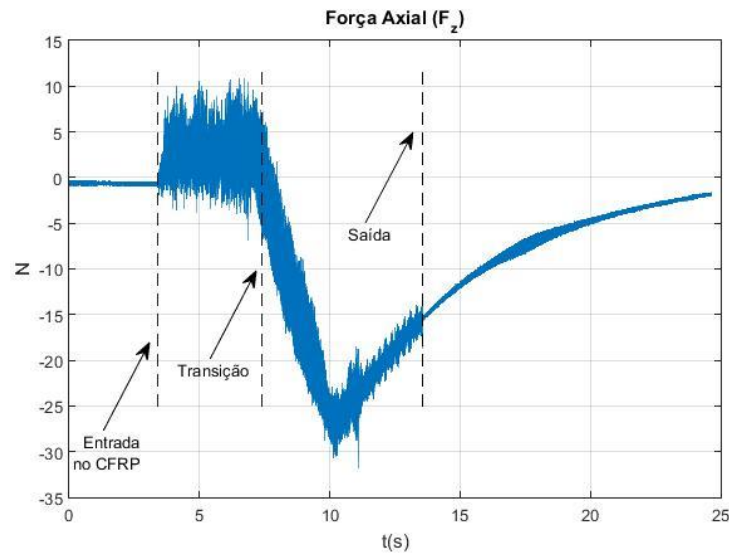


Figura 5.11 – Esforço axial (ensaio 4).

Analisando os esforços no plano, Figura 5.12 e Figura 5.13, é notável duas zonas bem distintas, representativas de cada material. Estes são equiparáveis na zona de carbono, com valores inferiores a 10 N. A maior dificuldade em maquinar o aço com a ferramenta para CFRP é evidente, com valores entre os 30 e 40 N contra os valores por volta dos 20 N verificados na furação com a ferramenta de aço. Isto suporta o que foi anteriormente dito em relação à maior flexibilidade da ferramenta para aço, pelo menos nos furos iniciais.

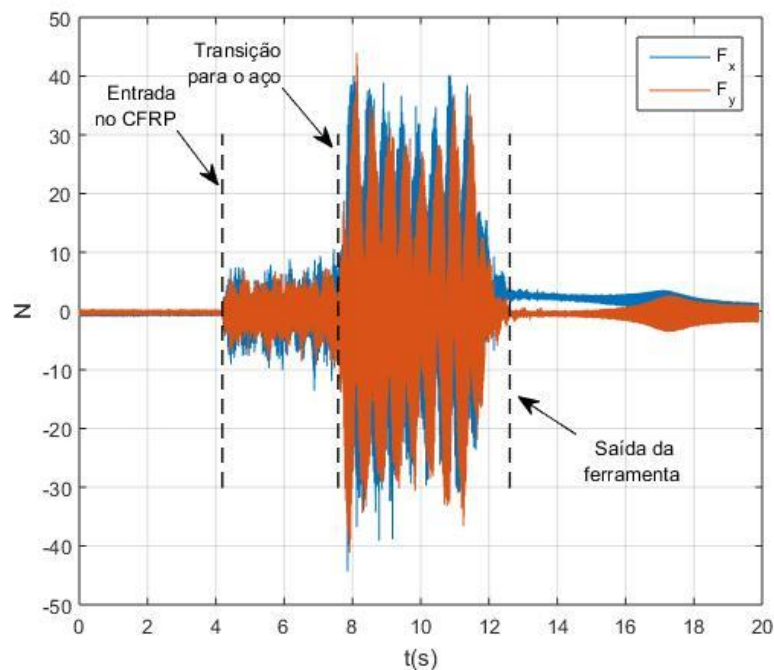


Figura 5.12 – Esforços de corte no plano (ensaio 2).

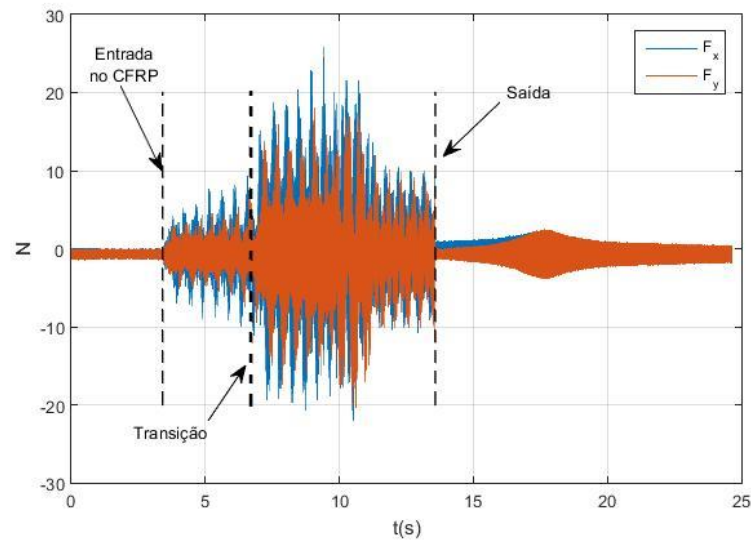


Figura 5.13 – Esforços de corte no plano (ensaio 4).

Comparando a furação pela ordem “normal” e inversa (ensaios 4 e 5), Figura 5.14, nota-se que a evolução dos esforços na camada de aço continua a ser transiente e um patamar é observável na zona de carbono, embora desta vez com valores negativos, significando que a ferramenta está puxada para fora do provete. No entanto, fica evidente a maior agressividade na transição de um material para outro. Uma explicação poderá residir no facto de que pela ordem normal, o aço já está ligeiramente sobre o efeito de forças, devido à maquinagem do CFRP, o que poderá contribuir para uma entrada mais suave no material.

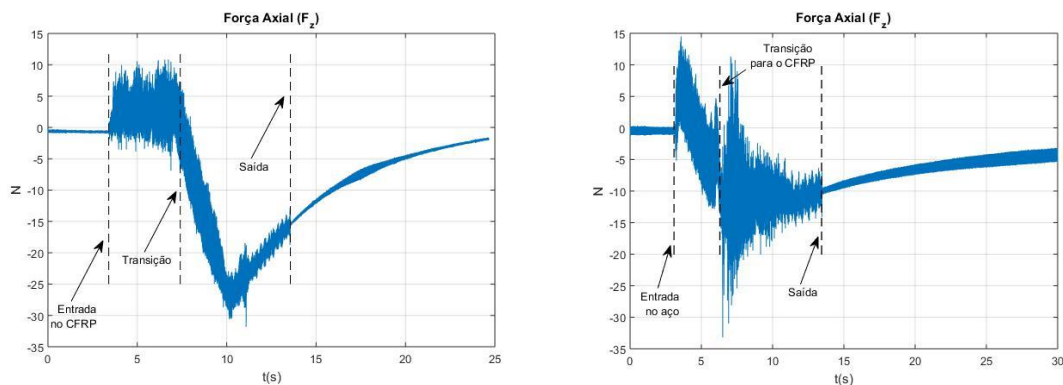


Figura 5.14 – Esforços de corte com ordens de furação contrárias: CFRP/aço (esquerda, ensaio 4) e aço/CFRP (direita, ensaio 5).

Em relação à análise do diâmetro dos furos, estes foram medidos com um micrómetro de interiores e os valores estão na Tabela 5.2. O diâmetro do ensaio 3 não foi medido pois este foi cortado a meio antes da medição para verificar o seu interior. No entanto, o seu valor tem pouco significado pois o material circundante ficou destruído e o furo é inaceitável. Os restantes furos estão todos abaixo dos 10 mm. Como se sabe, obter 10 mm certos é algo muito difícil e não repetível por motivos tais como as condições dos ensaios e até mesmo a precisão dimensional da ferramenta. Por este motivo existem intervalos de tolerância para vários parâmetros para definir se o furo é aceitável ou não.

Ao analisar a tabela é possível comparar diretamente os valores dos ensaios 4 e 5 e notar que ao inverter a ordem de furação se obteve um diâmetro de menor dimensão. No entanto, foi impossível tirar conclusões acerca dos diâmetros nos diferentes extremos pois a utilização do micrómetro não permitiu medir diferenças entre os diâmetros em cada material. Deste modo, os valores medidos foram considerados como sendo valores médios do furo.

Tabela 5.2 – Diâmetro dos furos realizados nos testes preliminares.

<i>Ensaio</i>	<i>Diâmetro</i>
1	9,927
2	9,970
3	-
4	9,996
5	9,988

Como dito anteriormente, o objetivo dos testes preliminares foi o de encontrar uma gama de valores para criar o plano de ensaios principal. Esta pequena quantidade de furos permitiu definir um limite superior e concluiu-se que ao optar pelos valores da Tabela 4.8 os resultados seriam interessantes porque ao utilizar os parâmetros mais baixos não se verificariam os fenómenos observados durante os testes preliminares. Juntamente com os parâmetros de corte, fica também justificado nesta secção o porquê da seleção da orientação do material híbrido durante a furação.

5.2. Qualidade dos Furos

Nesta secção realizar-se-á uma análise à qualidade dos furos obtidos no que toca ao diâmetro, delaminação e qualidade do furo na zona de aço. Antes da utilização de cada ferramenta, estas foram medidas com precisão no centro de maquinagem. Embora o diâmetro apresentado seja de 6 mm, este valor não é certo, tendo de estar contido num intervalo de tolerância para se considerar utilizável pelo que o diâmetro da ferramenta poderá ser ligeiramente maior ou menor que o valor nominal. Tal valor influencia o diâmetro final pois no *software* para a criação do percurso da ferramenta estes ligeiros desvios não são contabilizados e o percurso é realizado de acordo com o valor nominal. Com isto, os diâmetros das ferramentas utilizadas podem ser consultados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Nomenclatura das ferramentas utilizadas.

		<i>Diâmetro (mm)</i>
<i>Ferramenta para aço</i>	A1	5,9046
	A2	5,9186
	A3	5,9202
<i>Ferramenta para CFRP</i>	C1	5,5670
	C2	5,5184
	C3	5,6800

Passando agora para Figura 5.15, é possível verificar que os diâmetros obtidos com a ferramenta recomendada para CFRP foram menores que os obtidos com a ferramenta para aço. É possível verificar, também, uma tendência decrescente do diâmetro. O desgaste tem influência no resultado, mas é possível concluir que os parâmetros de corte apresentam também influência importante no diâmetro obtido com a ferramenta para CFRP. O motivo disto é o facto da matriz de ensaios não ter sido executada sempre pela mesma ordem pelo que o motivo não poderá ser exclusivo do desgaste da ferramenta. Observando agora os valores obtidos com a fresa para aço, estes apresentam-se muito próximos, não apresentando, aparentemente, uma sensibilidade muito elevada em relação aos parâmetros de corte utilizados e fruto do diâmetro superior das ferramentas os valores encontram-se muito mais próximos do valor de 10 mm desejado.

Em termos de delaminação, os resultados são globalmente satisfatórios. A maior parte dos furos apresenta poucos danos no que à delaminação diz respeito, com fatores de delaminação muitos baixos. Esta é uma característica já apontada por vários autores, sendo que nem todos a quantificam. Exceções a isto são apresentadas nas referências [93, 95]. Refira-se que a delaminação à entrada é geralmente muito menor que a delaminação à saída. Embora não tenha sido possível avaliar este valor, o facto de o compósito de carbono ser maquinado por cima do aço conjugado com o suporte do provete leva a crer que estes valores sejam igualmente baixos. Um aspeto mais notável é a degradação da matriz devido à temperatura de corte. A Figura 5.16 apresenta o furo com menor qualidade no que a este aspeto diz respeito. Estes foram realizados com a ferramenta para CFRP com os parâmetros mais agressivos (ensaio 3). Comparando este furo com o seguinte (ensaio 7), Figura 5.17, a diferença é notória. Embora o desgaste da ferramenta seja maior, pois os parâmetros do ensaio 3 danificam significativamente a ferramenta, fica evidente o efeito dos parâmetros de corte no resultado, mesmo tendo a ferramenta um desgaste superior.

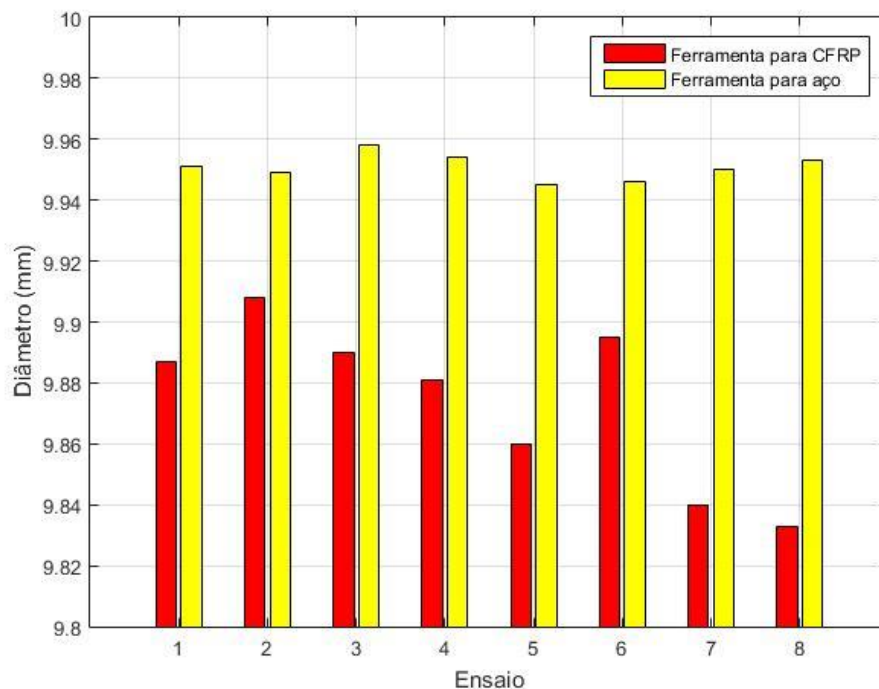


Figura 5.15 – Diâmetro médio dos furos obtidos em cada ensaio.

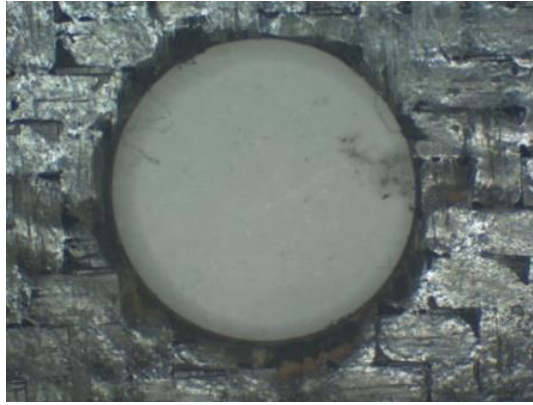


Figura 5.16 – Entrada do furo (repetição 3, ensaio 3) com de menor qualidade (ferramenta para CFRP).

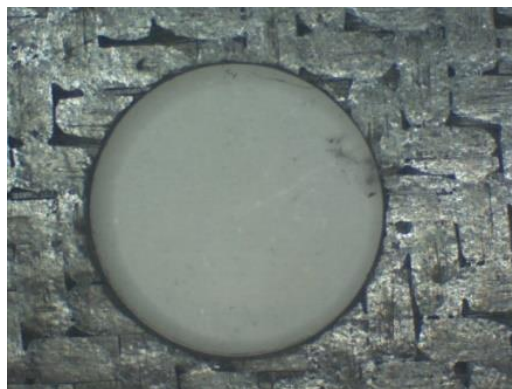


Figura 5.17 – Entrada no furo (repetição 3, ensaio7) realizado após o da figura anterior (ferramenta CFRP).

A utilização da ferramenta para aço apresentou resultados superiores, observáveis na Tabela 5.5, onde é possível comparar os furos de cada ensaio. São visíveis diferenças logo a partir do terceiro furo e tornam-se mais evidentes entre os ensaios 4 e 8, altura em que a ferramenta para CFRP apresenta um desgaste muito superior devido à maquinagem do aço, material para o qual não está projetada.

Analisando agora a saída do furo, correspondente à zona de aço verifica-se que a partir de certo ponto, devido à combinação dos parâmetros de corte com o desgaste da ferramenta, a temperatura de maquinagem tornou-se de tal maneira elevada que poderá ter dado origem a uma transformação térmica na sua periferia. Na Figura 5.18 apresenta-se um exemplo de um furo realizado com a fresa para CFRP, com os parâmetros de corte do ensaio 3, sendo este o quarto furo durante a realização da matriz de ensaios. A região afetada estende-se aproximadamente 1.35 mm do diâmetro do furo. Neste aspeto a ferramenta de aço obteve uma performance muito superior, o que não surpreende visto ser uma ferramenta para este tipo de material. Contudo, não foi isenta a este fenómeno e obteve-se um furo com transformações metalúrgicas de severidade similar à da Figura 5.19, com uma extensão de aproximadamente 1,1 mm para além do diâmetro do furo. Sendo a fresa para aço uma ferramenta apropriada para este material e, por isso, com menor dificuldade em o maquinar, este fenómeno de sobreaquecimento verificou-se em menor quantidade. Na Tabela 5.4 resumem-se os furos com problemas de sobreaquecimento.



Figura 5.18 – Sobreaquecimento na zona de aço maquinada com a ferramenta para CFRP (repetição 3, ensaio 3).

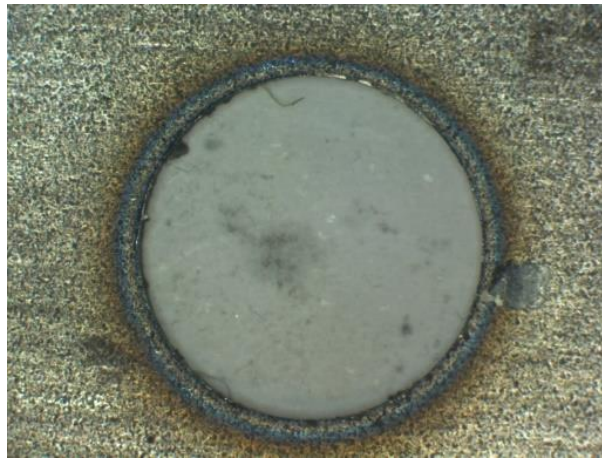


Figura 5.19 – Dano de aquecimento mais severo na zona de aço, quando maquinada com a ferramenta para aço (repetição 2, ensaio 4).

Tabela 5.4 – Furos que sofreram sobreaquecimento.

<i>Ferramenta/Recomendação</i>	<i>Repetição</i>	<i>Nº de Furos Afetados</i>
Aço	1	1
	2	2
	3	1
CFRP	1	4
	2	4
	3	4

Da Tabela 5.4 observa-se, portanto, que a ferramenta para CFRP é muito mais suscetível de sobreaquecer o metal. No entanto, é importante referir, também, que as extensões dos efeitos térmicos são muito diferentes. No caso da ferramenta para aço, o caso da Figura 5.19 poderá ser visto como uma exceção pois a extensão da zona térmica nos restantes furos afetados é similar à da Figura 5.20. Já no caso dos furos afetados durante a maquinação com a ferramenta para CFRP, todos tiveram danos de magnitude similar ao da Figura 5.18.

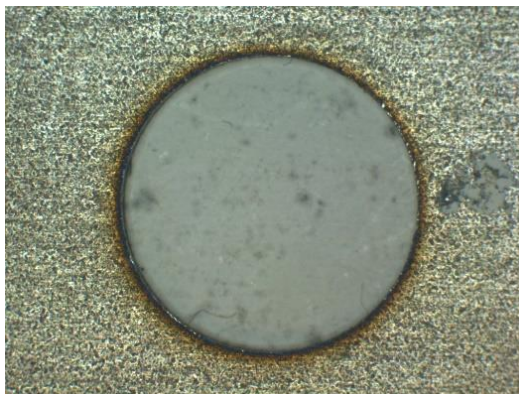


Figura 5.20 – Dano devido ao sobreaquecimento mais comum na zona de aço (ferramenta para aço)

O que foi descrito até este ponto pode ser observado visualmente na Tabela 5.6, que demonstra a evolução dos furos à medida que os ensaios vão sendo realizados.

Tabela 5.5 – Evolução do aspeto da entrada dos furos ao longo da matriz de ensaios.







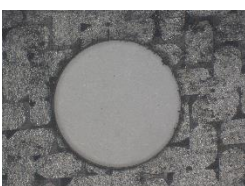
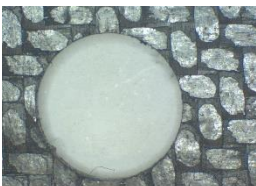













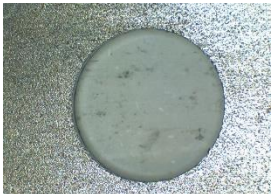







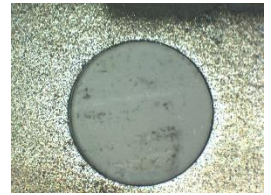


<i>Ferramenta para CFRP</i>	<i>Ferramenta para aço</i>	<i>Ensaio</i>
		1
		2
		3
		4
		5
		6
		7
		8

Tabela 5.6 – Evolução do aspecto da saída dos furos ao longo da matriz de ensaios.

<i>Ferramenta para CFRP</i>	<i>Ferramenta para aço</i>	<i>Ensaio</i>
		1
		2
		3
		4
		5
		6
		7
		8

5.3. Desgaste das ferramentas

Neste ponto será abordado o desgaste das ferramentas. Para tal, a nomenclatura da Tabela 5.3 será novamente utilizada.

Para qualquer das ferramentas o desgaste é evidente. Analisando a ferramenta para maquinar aço é evidente a remoção do revestimento nas extremidades das arestas de corte, assim como alterações na sua geometria. O desgaste das ferramentas A1 e A2 é semelhante, mas existe uma diferença notória quando comparadas com a ferramenta A3, que apresenta um desgaste menor. Não existindo diferenças no material utilizado, nem nos parâmetros de corte utilizados, esta diferença poderá ser possivelmente devido à ordem de execução dos ensaios que foi diferente para cada ferramenta e que, neste caso, poderá ter contribuído para um menor desgaste. Analisando as ferramentas para maquinar CFRP o desgaste é superior ao verificado pela ferramenta para aço. Tal se deve ao mau desempenho durante a furação do aço que contribui severamente para o desgaste observado. É importante salientar que os ensaios 3 e 4 da Tabela 4.10 foram muito agressivos, libertando faíscas como observado na Figura 5.1 e por isso estes parecem ser os principais responsáveis para o desgaste de ambos os tipos de ferramentas. Após estes ensaios, as arestas de corte ficam destruídas e isso ressurte-se nos ensaios consequentes já que são realizados com uma ferramenta em más condições, com menor capacidade de maquinagem que levam a esforços maiores e a um desgaste mais acelerado. A exceção acontece com a ferramenta A3, que parece ter sido sensível de forma positiva àquela ordem particular de realização dos ensaios, muito provavelmente por realizar os furos mais exigentes nas melhores condições (ferramenta nova). Esta diferença pode ser observada na Figura 5.21. No que toca à ferramenta para CFRP não houve diferenças, conforme a ordem de execução dos ensaios. No final, todas ficaram com as arestas de corte similares à apresentada na Figura 5.22. O estado final de todas as ferramentas pode ser observado na Tabela 5.7 e Tabela 5.8.



Figura 5.21 – Aresta de corte da fresa para CFRP após os ensaios

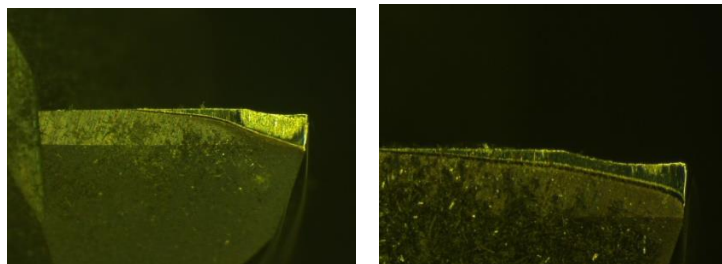


Figura 5.22 – Ferramentas de aço usadas: A3 (esquerda) e A1 (direita)

Tabela 5.7 – Fresa para maquinar aço antes e após os ensaios.

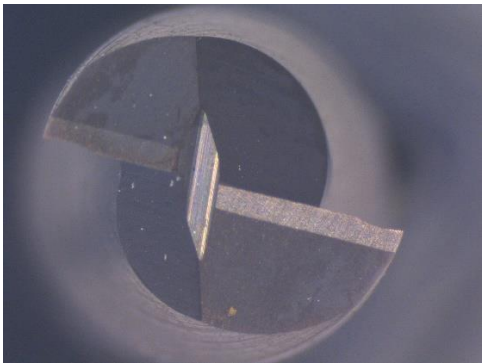
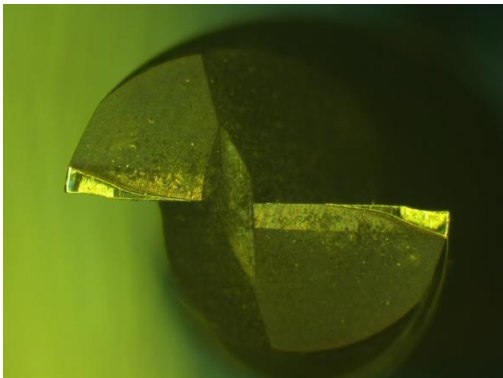
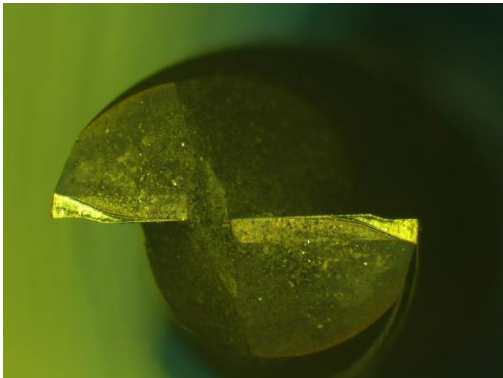
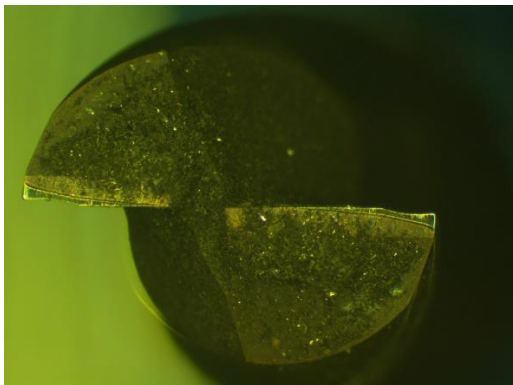
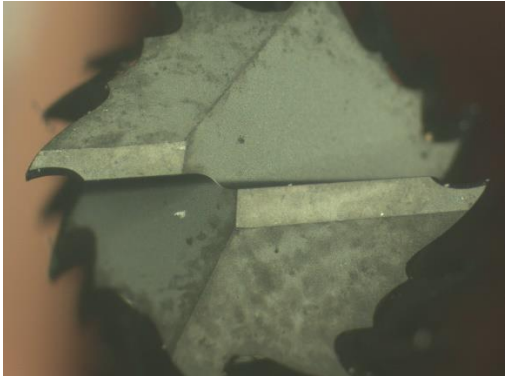
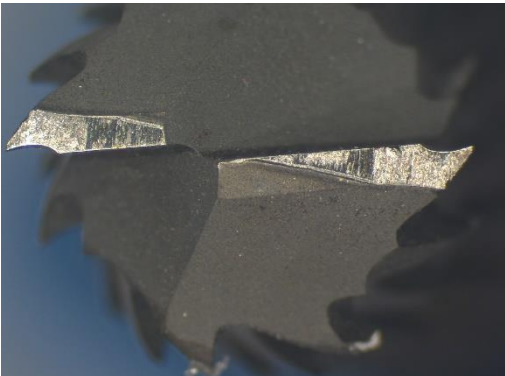

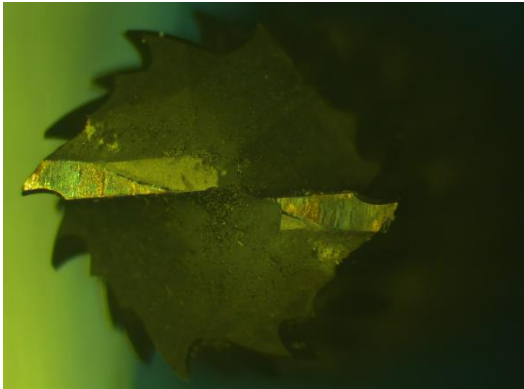
	Nova
	A1
	A2
	A3

Tabela 5.8 – Fresa para maquinar CFRP antes e após os ensaios.

	Nova
	C1
	C2
	C3

5.4. Esforços de corte

Uma análise importante é a dos esforços de corte. Como se verificou na análise dos ensaios preliminares a evolução do esforço axial aparenta ser bastante peculiar. Nesses ensaios verificou-se um patamar nítido durante a maquinagem de CFRP e uma evolução transiente do esforço axial durante a maquinagem do aço, apresentando valores negativos, representativos de que a ferramenta está a puxar o material ao invés de o empurrar, uma espécie de efeito de “parafuso”. Tal fenómeno foi novamente verificado durante a realização do plano de ensaios, Figura 5.23, mas é curioso reparar que durante a realização do plano de ensaios, nem todos os furos apresentaram uma evolução semelhante. As diferenças constam na existência de dois patamares definidos, Figura 5.24, possível devido ao tempo de maquinagem superior, e até mesmo dois patamares com valores positivos, Figura 5.25, que é possivelmente devido à subida súbita do esforço na transição dos materiais e que vai sendo atenuada posteriormente. Estes fenómenos foram observados para quaisquer das ferramentas.

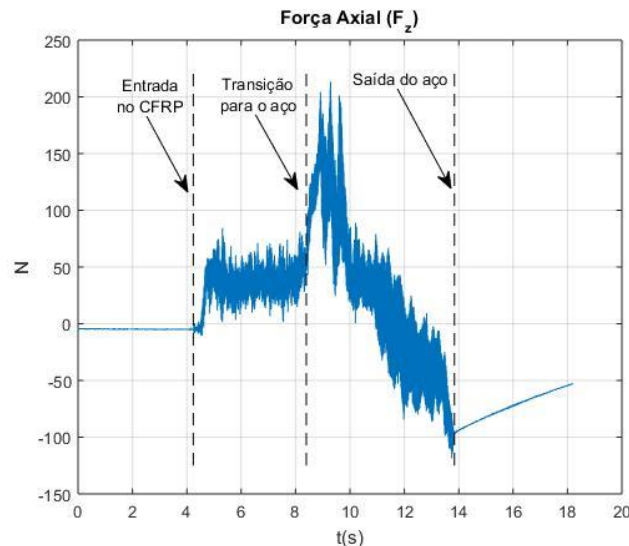


Figura 5.23 – Esforço de corte (repetição 3, ensaio 5) com patamar definido (CFRP) e evolução transiente do esforço axial (aço).

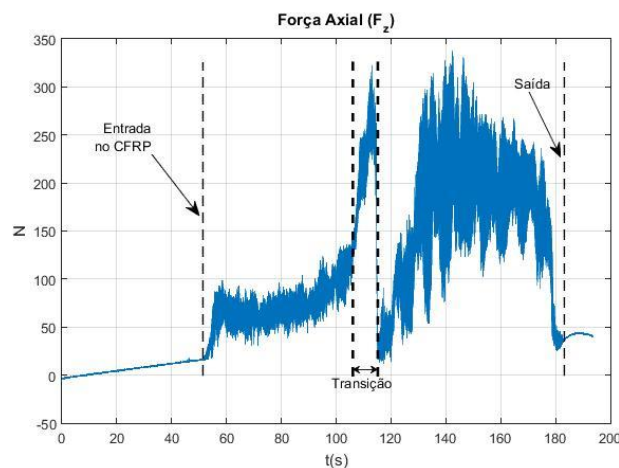


Figura 5.24 – Esforço de corte (repetição 3, ensaio 8) com dois patamares positivos.

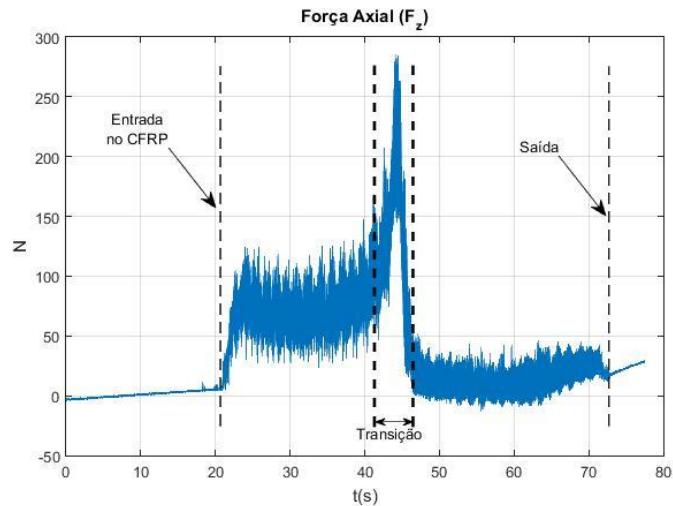


Figura 5.25 – Esforço de corte (repetição 3, ensaio 1) com dois patamares bem definidos.

Na Figura 5.26 é possível observar os valores máximos absolutos do esforço axial obtidos durante a realização dos ensaios. É importante referir que alguns dados dos ensaios com a ferramenta para CFRP não foram possíveis de analisar e que, por isso esta, análise carece de algum rigor. Para a comparação ser possível foram utilizados os valores obtidos da terceira repetição da matriz de ensaios com cada uma das ferramentas. A consequência é que a verificação da influência nos parâmetros de corte torna-se muito difícil, ou até impossível de realizar, devido à impossibilidade de obter valores médios.

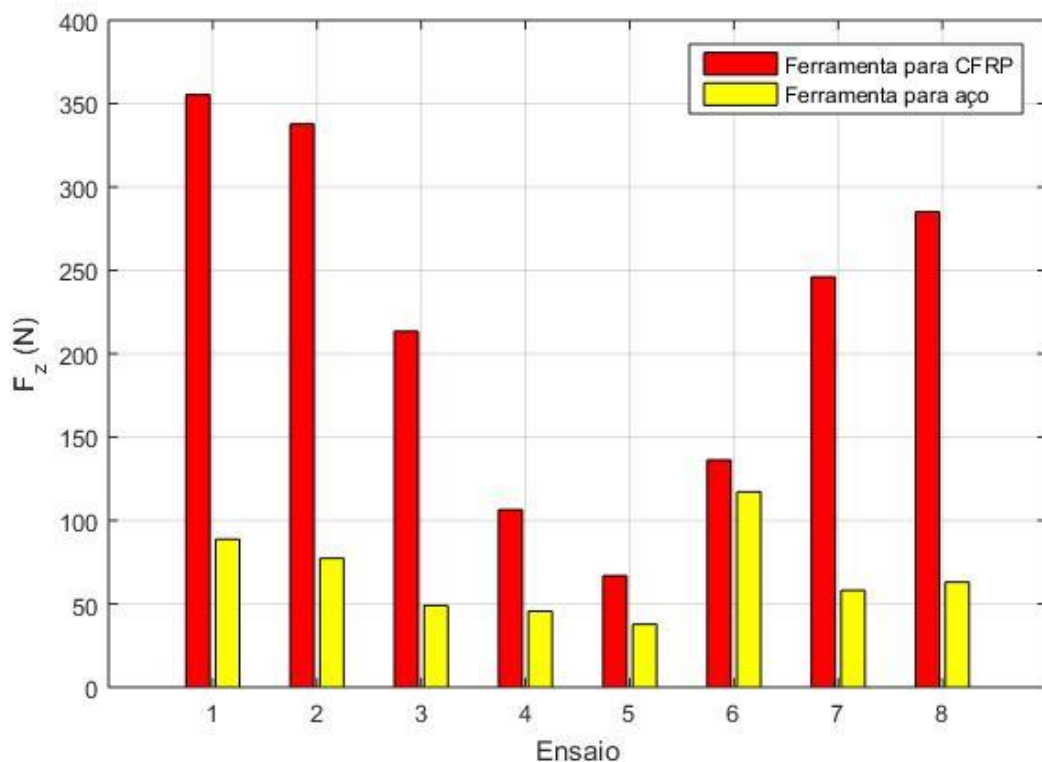


Figura 5.26 – Comparação do esforço axial máximo absoluto.

Analisando agora o gráfico, é possível verificar uma diferença considerável dos valores obtidos. Embora a diferença seja reduzida ao início, esta aumenta consideravelmente à medida que os ensaios vão sendo realizados. Tal se deve ao facto da fresa para CFRP não ser flexível para maquinar outros materiais além de plásticos reforçados com fibras. Quando a ferramenta para CFRP maquina o aço, esta é extremamente desgastada ao longo de cada ensaio ao ponto de no final levar a valores de esforço axial muito elevados.

Do gráfico é possível, também, tirar conclusões acerca do desgaste excessivo das fresas para CFRP observado na secção 5.3. Note-se que as forças axiais nos ensaios 4 a 6 são muito menores que os valores restantes. Tal se deve a estes terem sido os primeiros ensaios realizados nesta análise e, por isso, foram obtidos com uma ferramenta nova. Após estes furos, o desgaste da ferramenta influenciou os restantes resultados. Contudo, a ferramenta para aço esteve sujeita às mesmas condições e o efeito do desgaste foi menos severo, embora seja evidente um padrão similar.

A análise dos valores máximos é interessante, mas não possibilita uma análise detalhada do que acontece na zona de CFRP. Tal se deve ao facto de os valores máximos acontecerem praticamente sempre na zona do aço ou na transição para este material. Por forma a analisar o que acontece neste material (CFRP) em mais detalhe foi criada a Figura 5.27, representativa do esforço alcançado ao maquinar a zona do laminado de fibra de carbono. Observando a figura nota-se um padrão similar ao da Figura 5.26. No entanto, as diferenças são muito menores, mas mesmo assim significativas. Tal como na figura anterior, a diferença vai aumentando à medida que a ferramenta é utilizada, por culpa do desgaste resultante da maquinagem do aço.

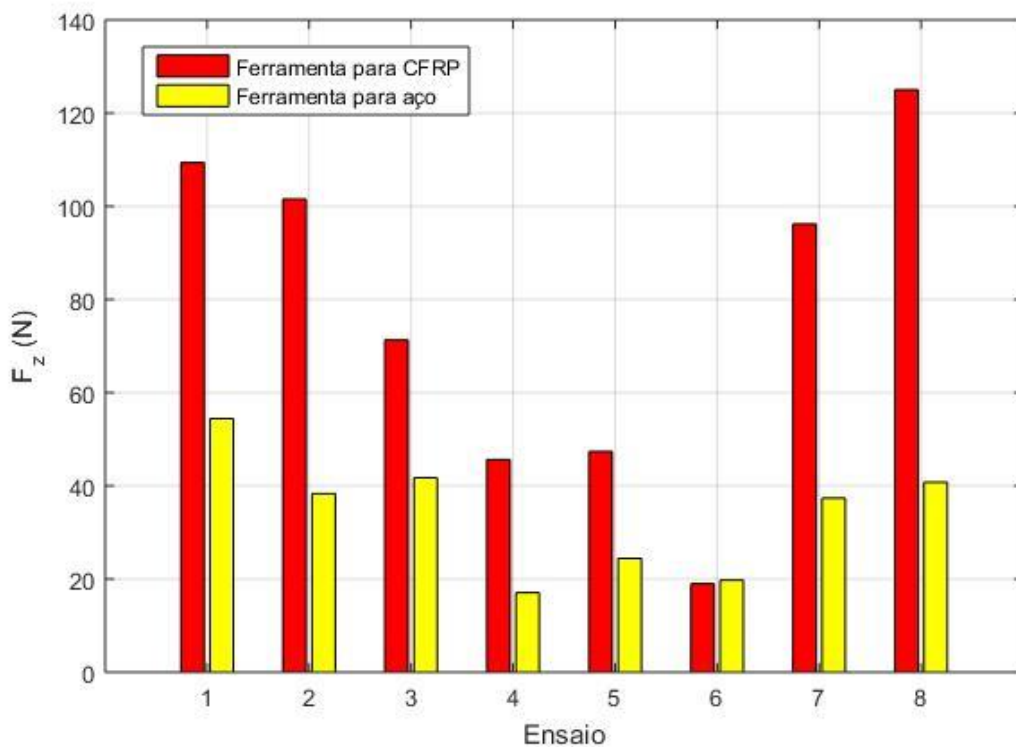


Figura 5.27 – Esforço axial na maquinagem do CFRP.

Passando para os esforços no plano, estes, ao contrário do esforço axial, apresentam sempre duas zonas bem definidas, do género da Figura 5.12, no que toca à ferramenta para CFRP. Semelhanças com [95] e [97] são observáveis na Figura 5.28 e Figura 5.29, representativas do primeiro e ultimo furos executados, na medida em que, após alguns furos, o esforço axial se torna muito superior às forças no plano. Aliás, em [95], o esforço axial é sempre superior enquanto que no presente trabalho, durante alguns dos furos iniciais, estes são da mesma magnitude. Quando se passa para a ferramenta recomendada para aço, um facto curioso é que, ao contrário do verificado com a ferramenta para aço dos testes preliminares, a ferramenta para aço utilizada na realização de ensaios originou esforços no plano praticamente indistinguíveis em cada material na maioria dos ensaios, do género da Figura 5.30. Quando este não é o caso, os esforços apresentam um formato similar ao da Figura 5.28 que, embora apresente ligeiras diferenças conforme o material que está a maquinar, estas são muito menores quando comparadas com os esforços obtidos com a ferramenta para maquinar aço dos testes preliminares. É de salientar, também, que, para a ferramenta para maquinar aço, os esforços no plano não sofrem grandes alterações em termos de valores máximos, como é possível observar, novamente, através da Figura 5.28 e Figura 5.29.

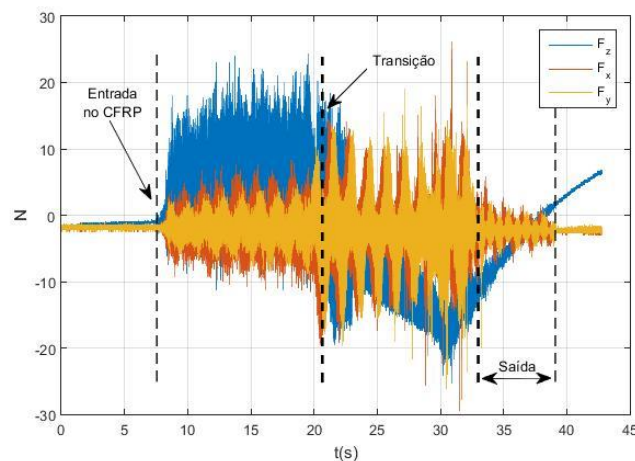


Figura 5.28 – Esforços de corte (repetição 1, ensaio 1) durante o primeiro furo de uma matriz de ensaios (ferramenta para aço).

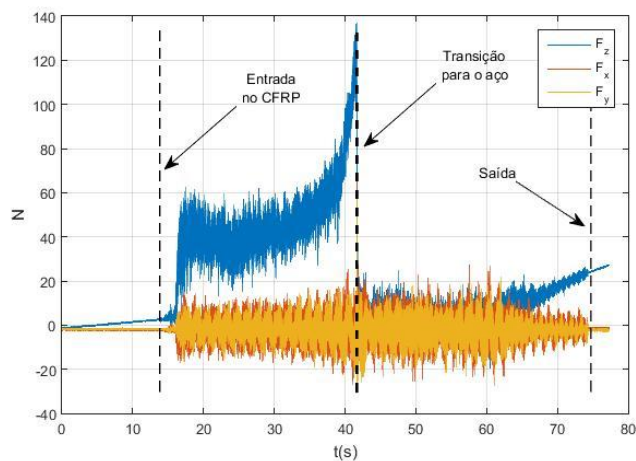


Figura 5.29 – Esforços de corte (repetição 1, ensaio 8) durante o primeiro furo de uma matriz de ensaios (ferramenta para aço).

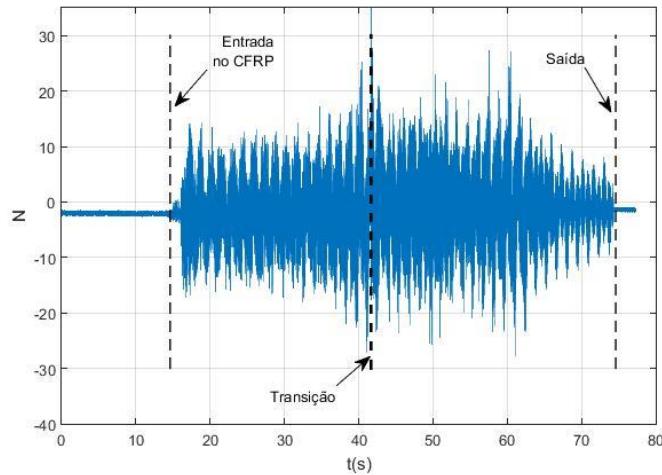


Figura 5.30 – Esforço no plano durante a furação orbital com a ferramenta para aço (repetição 1, ensaio 8).

Comparando ambas as ferramentas recomendadas para maquinar aço e CFRP, Figura 5.31, verifica-se a mesma tendência do que tem vindo a ser descrito até agora. A ferramenta para CFRP apresenta esforços muito superiores e as diferenças vão sendo cada vez maiores à medida que os ensaios são executados. Aliás, até nos ensaios iniciais a diferença já é considerável. A tendência mantém-se a mesma, ou seja, estes valores são obtidos na zona de aço, onde a ferramenta para CFRP não tem um bom desempenho. Mesmo assim, é surpreendente o quão grande é a diferença. Neste aspeto a ferramenta para aço revela-se, inclusive, algo insensível à alteração dos parâmetros de corte.

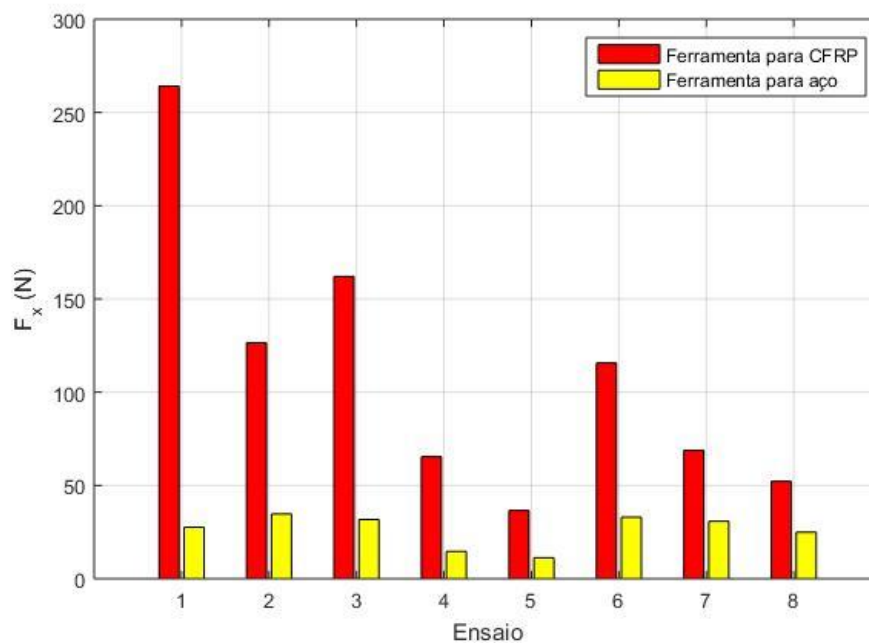


Figura 5.31 – Esforço máximo no plano.

5.5. Análise ANOVA

Até este ponto foi realizada uma análise mais qualitativa dos resultados. Para quantificar a influência de cada parâmetro de corte nos resultados recorreu-se a uma Análise de Variância (ANOVA), que não é mais que um tratamento estatístico dos resultados. Como referido na secção 5.4., não foi possível obter dados para uma análise ANOVA para a ferramenta recomendada para maquinar CFRP. Contudo, com os dados obtidos foi possível realizar uma análise ANOVA à ferramenta para maquinar aço, que, neste ponto, é a que apresenta maior interesse devido aos melhores resultados obtidos com ela. Assim sendo, este ponto focar-se-á nessa ferramenta. Toda a análise foi realizada recorrendo ao *software Minitab*.

Para a análise foi estabelecido que o *P-value* (valor de prova) foi de 0.05, correspondente a um intervalo de confiança de 95%. O significado deste valor é que se algum fator tiver um *P-value* menor que o estipulado então este é considerado significativo enquanto que se for superior o fator em questão, apesar de poder ter alguma influência, é excluído do modelo. A contribuição percentual de cada fator no resultado pode ser conhecida e é da pela expressão (5.1).

$$P_A = \frac{(Soma\ de\ quadrados_A - (Média\ de\ quadrado\ residual * df_A))}{Total\ da\ soma\ de\ quadrados} \quad (5.1)$$

Onde P_A representa a contribuição percentual do fator A e df_A representa o número de graus de liberdade do mesmo fator.

Analisando as forças de corte, valores da Tabela 5.9, verifica-se que o avanço por rotação orbital é o parâmetro com maior importância, seguido do valor do avanço tangencial por dente. A velocidade de corte, por outro lado, apresenta um *P-value* superior ao estipulado e por isso não é considerado como estatisticamente importante para os resultados. Ao mesmo tempo verifica-se que a sua contribuição percentual é muito reduzida, e quase desprezável.

Tabela 5.9 – Resultados da análise ANOVA para o esforço axial.

<i>Fonte</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Média de Quadrados</i>	<i>F-value</i>	<i>P-value</i>	<i>P_A (%)</i>
V_c	1	136,5	136,5	1,22	0,331	0,5
f_z	1	980,8	980,8	8,80	0,041	17,35
a_p	1	3445,3	3445,3	30,92	0,005	66,5
<i>Residuo (Erro)</i>	4	445,7	111,4	-	-	15,65
<i>Total</i>	7	5008,3	-	-	-	100

Conclui-se, portanto, que tanto o avanço tangencial por dente como o avanço axial por rotação orbital são significativos nos resultados, no que se toca aos esforços de corte. O modo como estes influenciam este parâmetro pode ser observado na Figura 5.32 e Figura 5.33, representativas da variação da força axial com o aumento do *pitch* e do avanço tangencial por dente, respetivamente. Analisando as figuras observa-se uma tendência similar em ambos os casos. Com o aumento de ambos os parâmetros verifica-se um decréscimo no esforço axial. Este facto foi notável durante a realização dos ensaios na medida em que os ensaios mais curtos, e por isso com os parâmetros superiores, geravam menores esforços. Saliente-se que, embora as forças decresçam com o aumento de qualquer um destes parâmetros, o decréscimo é superior com o aumento do *pitch*, o que é evidenciado pelo resultado da análise ANOVA que o apresenta como o parâmetro mais importante e é observável na Figura 5.34. É visível, também, que para obter menor esforços de corte é aconselhada a utilização de avanços tangencial e axial elevados. Este último é mais influente caso o avanço axial tenha um valor elevado. No entanto, não é possível responder se tal combinação de valores seja adequada para provetes mais espessos. O que foi discutido até agora contrasta com os resultados apresentados por [93], que verifica um aumento do esforço axial com o aumento do avanço por dente e com o aumento do avanço por rotação orbital, embora este último apresente um ponto onde começa a decrescer. Contudo, os resultados estão de acordo no que à influência da velocidade de corte diz respeito, apresentando um efeito baixíssimo. Refira-se que em [93] o material utilizado foi exclusivamente polímero reforçados com fibras de carbono. Embora contraditório com a investigação anterior, as tendências obtidas concordam parcialmente com as obtidas em [91], na medida em que um aumento do avanço tangencial por dente leva a um decréscimo do esforço axial. Na investigação referida [91], o material maquinado é uma combinação de CFRP/Titânio, pelo que existem algumas semelhanças. O facto de o aço utilizado ser um aço de alta resistência, aço DP600, mais difícil de maquinar poderá ter contribuído para este efeito. Saliente-se ainda o facto do esforço axial ser influenciado grandemente pelos fatores escolhidos para os ensaios. Os 3 fatores em questão contribuem para aproximadamente 85% da resposta obtida, com os restantes 15% a serem devido a ruído e a fatores não controláveis.

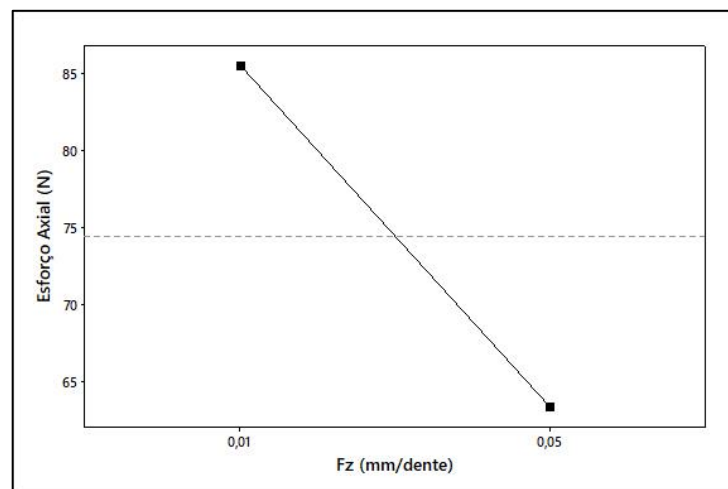


Figura 5.32 – Influência do avanço por dente no esforço axial.

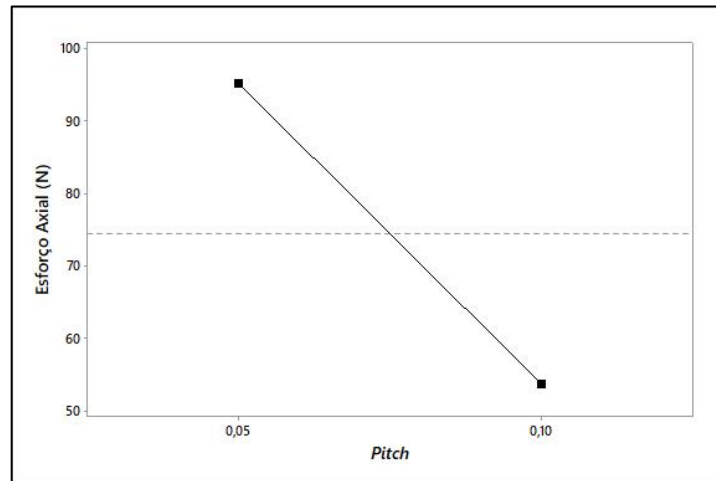


Figura 5.33 – Influência do *pitch* no esforço axial.

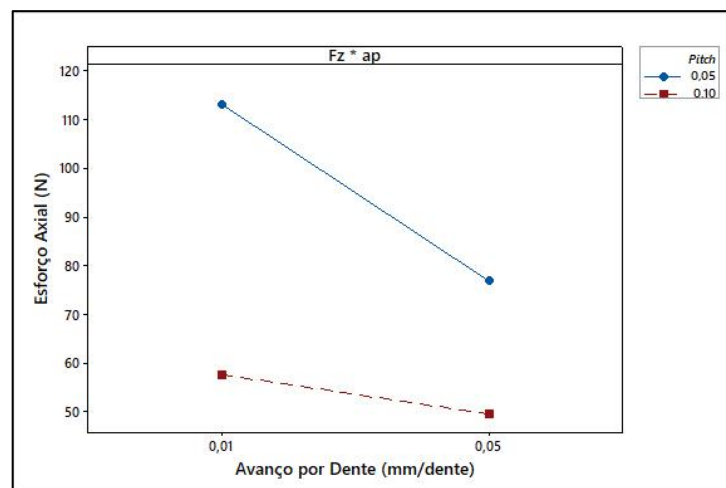


Figura 5.34 – Interação entre o avanço por dente e o avanço por rotação orbital.

5.6. Furação Orbital vs Furação Convencional

Esta pequena secção pretende fornecer uma comparação entre os dois tipos de furação: a furação convencional e a furação orbital. Como referido anteriormente, a furação convencional foi realizada com um único conjunto de parâmetros de corte. Embora o diâmetro do furo seja diferente e de menor dimensão (10 mm para a furação orbital contra 6 mm do furo realizado com a broca), um único furo foi suficiente para destruir a broca. Como se pode ver na Figura 5.35, existem arestas quebradas e adesão do metal nas mesmas devido à elevada temperatura de corte. Com isto, prevê-se que a realização de um furo com 10 mm deveria produzir piores resultados.

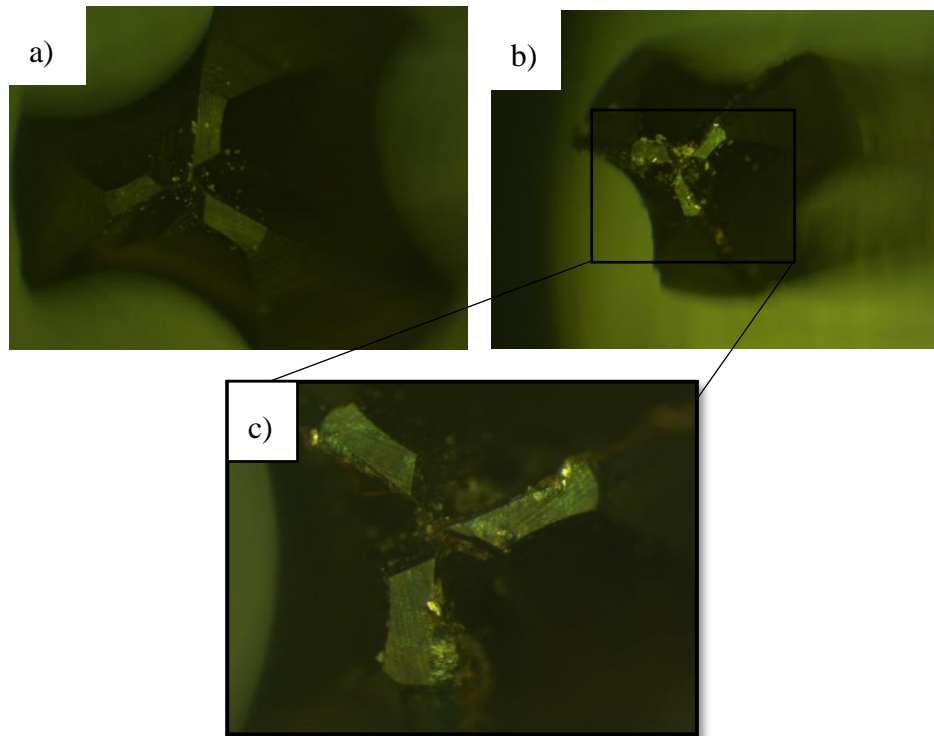


Figura 5.35 – Broca de dentes retos: a) nova; b) após o furo e c) vista aproximada das arestas de corte.

Analisando o furo resultante da furação convencional é notável a baixa qualidade do mesmo, com uma grande quantidade de fibras arrancadas, delaminação e má precisão dimensional na zona de CFRP, Figura 5.36 a). Já no metal, o resultado é igualmente negativo, como se pode observar na Figura 5.36b), onde se verifica a existência de rebarbas que obrigariam a nova operação de maquinagem para a sua remoção. Comparando este furo, o primeiro com a broca, com qualquer dos primeiros furos realizados nos ensaios de furação orbital a diferença é notória, quer no compósito reforçado com fibras de carbono, não apresentando fibras soltas, delaminação e apresentando precisão dimensional superior, quer no aço. Estas diferenças de qualidade podem ser observadas na Figura 5.37 e na Figura 5.38.

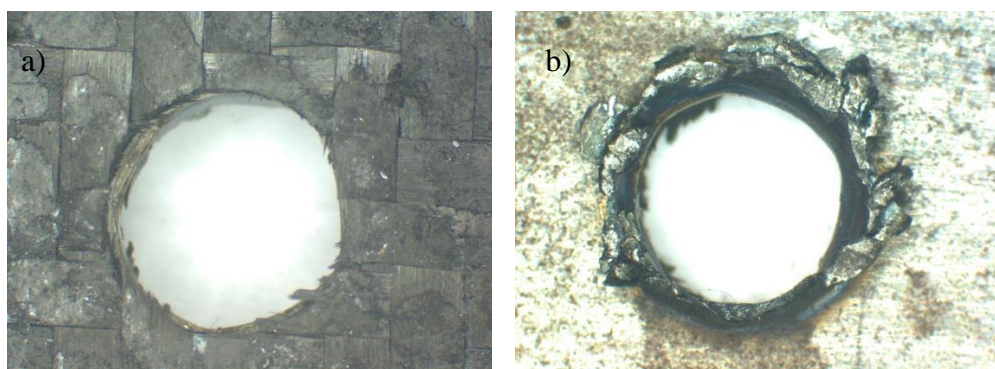


Figura 5.36 – Furo realizado com a broca (furação convencional): a) entrada do furo e b) saída do furo.

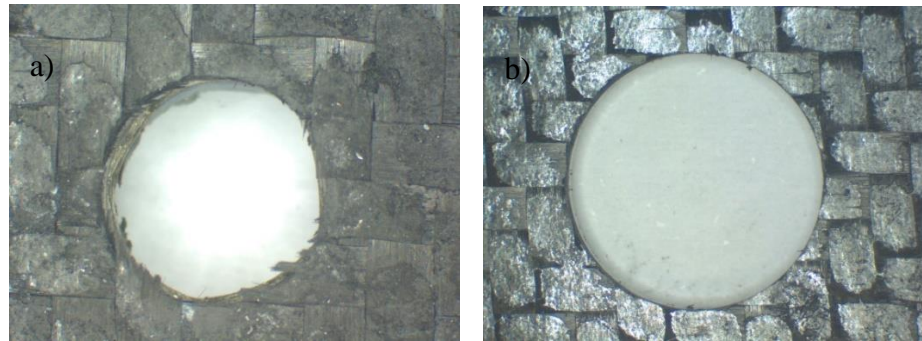


Figura 5.37 – Entrada do furo (CFRP) pelo processo de: a) furação convencional e b) furação orbital.

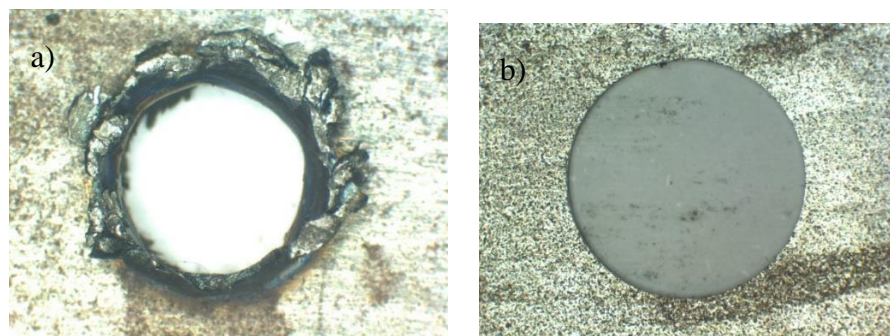


Figura 5.38 – Saída do furo pelo processo de: a) furação convencional e b) furação orbital.

Em termos de esforços de corte na furação convencional, Figura 5.39, verifica-se também uma diferença muito grande nos valores quando comparados com os valores da furação orbital, Figura 5.40. Os valores do esforço axial do primeiro furo da furação convencional são da mesma magnitude dos ensaios de furação orbital realizados com os parâmetros mais agressivos, que destroem a ferramenta no processo e por isso aumentam consideravelmente a força necessária para realizar o furo. Da figura verifica-se, também, que a entrada da ferramenta no material é muito agressiva, existindo uma subida íngreme do esforço axial nesta altura. Adicionalmente, destaca-se a saída da ferramenta, que, ao contrário das verificadas na furação orbital, é algo conturbada. Uma possível explicação pode residir no contacto que se mantém entre as arestas de corte, retas, da broca e o material, mesmo quando a ponta já está fora do material. Uma pequena comparação com [78] é possível no que toca à parte de CFRP. Na investigação em causa verificaram-se valores inferiores tanto para o binário como para o esforço axial. Uma possível explicação pode residir nos parâmetros de corte utilizados na investigação, assim como algumas diferenças na geometria da ferramenta.

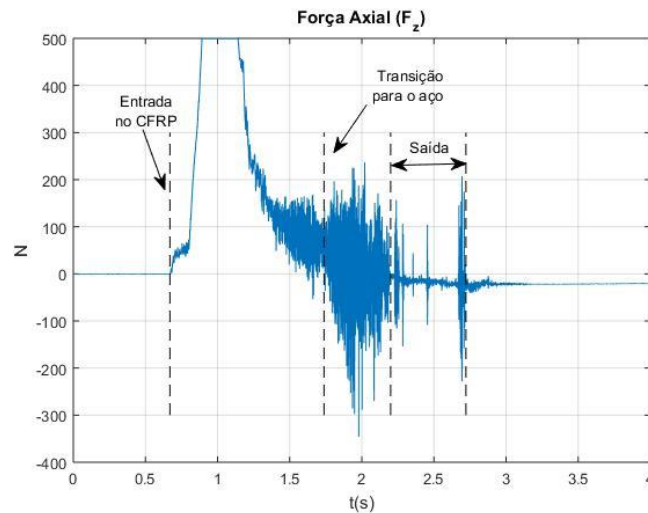


Figura 5.39 – Esforço axial durante a furação convencional.

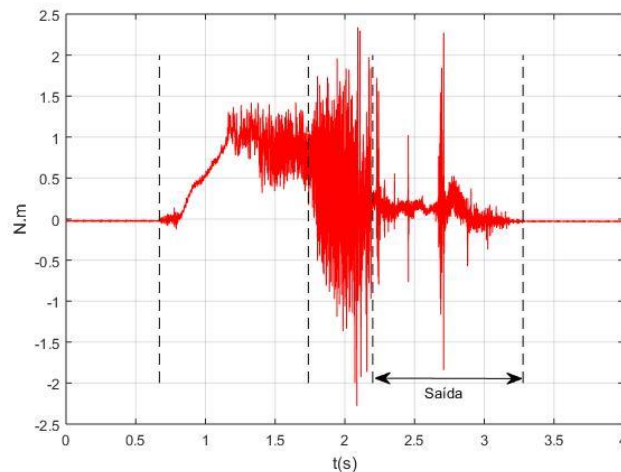


Figura 5.40 – Binário durante a furação convencional.

Esta pequena secção demonstra as vantagens da furação orbital, que mesmo com parâmetros agressivos conseguiu resultados de melhor qualidade em furos de diâmetros superiores, apresentando menos delaminação, menores esforços e acabamento muito superior quando comparado com a furação convencional. Isto é verificado em todos os ensaios de furação orbital efetuados. Embora o furo obtido por furação convencional tivesse demorado muito pouco tempo a ser efetuado, a necessidade de acabamento (se possível) para a remoção das rebarbas aumenta consideravelmente o tempo total para obter um furo qualidade aceitável, isto no que toca ao metal. No que toca à zona de CFRP a remoção das fibras observáveis na Figura 5.37 poderia ser uma solução, mas o formato deformado do furo poderia levar a que este fosse descartado. Isto levanta a discussão acerca do tempo de maquinagem e da rentabilidade que se pode obter do processo. Embora a operação em si demore menos tempo no caso da furação convencional, existem outros fatores que devem ser contabilizados para uma análise precisa tais como a necessidade de processos adicionais de acabamento, o desgaste das ferramentas e o material descartado.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Neste trabalho foi investigada a furação orbital de compósitos híbridos aço/CFRP. Para tal, foi executado um plano de ensaios com duas ferramentas, uma adequada para cada material, por forma a ser possível analisar a qualidade dos furos obtida. No final foi possível concluir que a ferramenta para aço é mais adequada para a maquinação desta combinação de materiais, apresentando melhores resultados em praticamente todos os aspetos (forças de corte, danos no material, diâmetro final e desgaste da ferramenta). Ficou evidente que a geometria da ferramenta para CFRP apresenta muito pouca flexibilidade para maquinar materiais que não sejam polímeros reforçados com fibras. Esta apresenta esforços de corte muito maiores, desgaste muito superior e os diâmetros são menores que os obtidos com a ferramenta para aço. No entanto, refira-se que a utilização de uma ferramenta do género para este tipo de operações é muito incomum, não existindo referências à sua utilização na literatura. A maior parte das investigações observadas durante a revisão bibliográfica utilizam fresas similares à utilizada para maquinar aço, com uma geometria helicoidal bem definida, não contendo as arestas de corte secundárias.

Ficou evidente que, como resultado da maquinação a seco, as elevadas temperaturas levam a que ocorra a degradação da matriz e a um sobreaquecimento do aço, que pode levar a alterações na sua microestrutura.

A delaminação não se apresentou como sendo um problema de maior, sendo praticamente inexistente. Como referido anteriormente, este facto é um dos principais benefícios da furação orbital. Igualmente, a estratégia de furação iniciando pelo CFRP permite que o aço funciona como placa de apoio, evitando a delaminação típica dos materiais compósitos na saída da ferramenta.

Através de uma análise ANOVA concluiu-se que o parâmetro mais influente foi o avanço por rotação orbital, um parâmetro inerente a este processo, no que toca às forças de corte. Durante a análise foi, também, verificado que o avanço tangencial por dente é consideravelmente influente nos esforços de corte, embora não tanto como o avanço por rotação orbital enquanto que a velocidade de corte apresenta uma influência mínima. Estes três fatores totalizam aproximadamente 85% da influência total na resposta pelo que existem uma contribuição importante de outros fatores não mensuráveis na resposta obtida.

Para finalizar uma comparação entre a furação convencional foi realizada e os resultados claramente mostram as vantagens da furação orbital, apresentado os furos correspondentes uma qualidade muito superior. Refira-se, no entanto, que a broca utilizada não é utilizável de todo no material metálico em condições normais. Para uma comparação mais lógica, uma broca helicoidal seria uma opção mais conveniente.

6.2. Trabalhos Futuros

Pode dizer-se que este trabalho serviu de introdução ao tema da furação de híbridos aço/CFRP pelo que vários trabalhos futuros são possíveis, para dar continuação ao que foi realizado até este ponto. De seguida são apresentadas algumas ideias:

- a utilização de uma ferramenta nova para cada ensaio permite obter uma maior precisão na influência dos parâmetros de corte no resultado final dos furos;
- analisar a rugosidade obtida, verificar se o acabamento superficial é aceitável e verificar a influência dos parâmetros de corte neste aspeto, observando a superfície interior dos furos;
- seleccionar o conjunto de parâmetros que permite melhores resultados e realizar mais furações para analisar o desgaste da ferramenta de uma maneira mais detalhada;
- a utilização de ferramentas adaptadas para maquinar FMLs e análise dos resultados permitiria comparar o seu desempenho contra as ferramentas utilizadas neste trabalho, em que cada tipo era adaptada para um certo material, e não projetada para maquinar uma combinação de ambos;
- Maquinagem de FMLs com outros tipos de aço;
- Devido à elevada capacidade de processamento atual, simulações recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, em particular a modelação dos materiais e as suas interfaces, permitiriam reduzir o número de ensaios;
- Por forma a diminuir o esforço axial podem-se realizar ensaios com uma base amortecida, como utilizado em [73]. No entanto, em vez de amortecedores a utilização de cortiça, um material abundante em Portugal e com propriedades de amortecimento interessantes, poderia ser investigada.

Referências

- [1] Strong, A.B., *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Society of Manufacturing Engineers. 2008. ISBN 978-0872638549. pp. 1-16.
- [2] Mar-Bal. *History of Composite Materials*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>
- [3] Boeing. *Advanced Composite Use*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>.
- [4] *Red Corvette C1*. 2015. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://americanmuscle.deviantart.com/art/Red-Corvette-C1-505930956>.
- [5] McLaren. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://www.mclaren.com/formula1/heritage/cars/1981-formula-1-mclaren-mp4-1/>.
- [6] Vink, D. *BMW Carbon Core and more*. 2016. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.plasticsnewseurope.com/article/20160310/PNE/160319987/bmws-carbon-core-and-more>.
- [7] Sloan, J. *Multimaterialism is back in the Audi A8*. 2017. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://www.compositesworld.com/blog/post/multimaterialism-is-back-in-the-audi-r8>.
- [8] Jay, M.L. *Longer, Stronger, Lighter, Cheaper*. 2017. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/05/improvements-in-composite-turbine-blades-power-the-wind-industry/>.
- [9] Brøndsted, P., H. Lilholt, and A. Lystrup, *Composite materials for wind power turbine blades*. Annu. Rev. Mater. Res., 2005. **35**: pp. 505-538.
- [10] Al-Maadeed, M. and S. Labidi, *Recycled polymers in natural fibre-reinforced polymer composites*, in *Natural Fibre Composites*. 2014, Elsevier. pp. 103-114.
- [11] Mohammed, L., et al., *A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications*. International Journal of Polymer Science, 2015. **2015**.
- [12] *Materiais Compósitos*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://disciplinas.ist.utl.pt/qgeral/mecanica/MatComp.pdf>.
- [13] Marques, A.T., *Apontamentos de Sistemas Compósitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2017.
- [14] *Multilayer Woven Fabric / Profile / Joint / Billet*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://3dwovens.com/>.
- [15] *Tecido de Fibra de Carbono RC203P*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://www.e-composites.com.br/tecido-de-fibra-de-carbono-rc203p/prod-4871634/>.
- [16] *Continuous Aramid Fibres (Roving)*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://www.compositeshop.de/xoshop/lng/en/fibers/carbon-fiber/continuous-aramid-fibres-roving.html>.
- [17] *TORAYCA™ Carbon fiber prepreg / epoxy resin*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.directindustry.com/prod/toray-carbon-fiber-composite-materials/product-37814-259630.html>.

- [18] *Uniflo Continuous Filament*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://www.ecfibreglasssupplies.co.uk/product/uniflo-continuous-filament-300g-138m-wide>
- [19] Zhigilei, L.V. *Chapter 17. Composites*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.virginia.edu/bohr/mse209/chapter17.htm>.
- [20] Winter, N. *SEM of Concrete*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: http://semcementtraining.com/sem-cement-imaging/image2/?doing_wp_cron=1522858928.1533548831939697265625.
- [21] Östberg, G., et al., *Mechanisms of plastic deformation of WC–Co and Ti(C, N)–WC–Co*. Vol. 24. 2006 135-144.
- [22] Sandvik. *Cermet*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/cermet/pages/default.aspx.
- [23] Rawal, S.P., *Metal-Matrix Composites for Space Applications*. JOM, 2001: pp. 14-17.
- [24] Machine Design. *Metal-Matrix Composites*. 2002. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.machinedesign.com/basics-design/metal-matrix-composites>.
- [25] MC-21. *Metalic Composites for the 21st century*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://www.mc21inc.com/>.
- [26] Brito, F.J.M.M.de, *Comportamento Mecânico das Camadas Usadas na Construção de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica*. 1997. pp. 13-19.
- [27] Strong, A.B., *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Society of Manufacturing Engineers. 2008. ISBN 978-0872638549. pp. 207-211.
- [28] Ray, S. *See Ray SDX 250*. 2018. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <http://global.searay.com/page.aspx/pageid/163647/pmid/368325/SDX-250.aspx>.
- [29] *Surfacing Veil Mat*. 2018. Acedido em Fevereiro de 2018, em: https://www.tapplastics.com/product/fiberglass/fiberglass_fabrics/surfacing_veil_mat/90.
- [30] Strong, A.B., *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Society of Manufacturing Engineers. 2008. ISBN 978-0872638549. pp. 211-222.
- [31] Pervaiz, M., et al., *Emerging trends in automotive lightweighting through novel composite materials*. Materials Sciences and Applications, 2016. 7(1): pp. 26-38.
- [32] Clark, L.a. *Carbon Fiber Violin*. Acedido em Fevereiro de 2018, em: <https://luisandclark.com/product/violin/>.
- [33] Strong, A.B., *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Society of Manufacturing Engineers. 2008. ISBN 978-0872638549 pp. 222-227.
- [34] Astrom, B.T., *Manufacturing of polymer composites*. CRC Press. 1997. ISBN 978-0748770762.
- [35] Li, Z., et al., *Microstructure of carbon nanotubes/PET conductive composites fibers and their properties*. Composites Science and Technology, 2006. 66(7-8): pp. 1022-1029.

- [36] Chae, D.W. and B.C. Kim, *Thermal and rheological properties of highly concentrated PET composites with ferrite nanoparticles*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(7-8): pp. 1348-1352.
- [37] Gardner, D.J., Y. Han, and L. Wang, *Wood-plastic composite technology*. Current Forestry Reports, 2015. **1**(3): pp. 139-150.
- [38] Swolfs, Y., et al., *Tensile behaviour of intralayer hybrid composites of carbon fibre and self-reinforced polypropylene*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. **59**: pp. 78-84.
- [39] Jec Composites. *Carbon/Flax hybrid structures show improved vibration damping and impact behaviour*. 2016. Acedido em Março de 2018, em: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/carbonflax-hybrid-structures-show-improved-vibration-damping>.
- [40] Gardiner, G. *Hybrid carbon fiber/aluminum suspension knuckle*. 2017. Acedido em Março de 2018, em: <https://www.compositesworld.com/articles/hybrid-carbon-fiberaluminum-suspension-knuckle>.
- [41] Gardiner, G. *Metal + composite = Less weight, more room*. 2016. Acedido em Março de 2018, em: <https://www.compositesworld.com/articles/metal-composite-less-weight-more-room>.
- [42] Zhang, J., et al., *Glass/carbon fibre hybrid composite laminates for structural applications in automotive vehicles*, in *Sustainable Automotive Technologies 2012*. Springer. 2012. pp. 69-74.
- [43] Sinmazçelik, T., et al., *A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods*. Materials & Design, 2011. **32**(7): pp. 3671-3685.
- [44] Qaiser, H., et al., *Optimization of interlaminar shear strength behavior of anodized and unanodized ARALL composites fabricated through VARTM process*. International Journal of Material Forming, 2015. **8**(3): pp. 481-493.
- [45] Jensen, B., et al. *Fabrication of Fiber Metal Laminates by Non-Autoclave Processes*. In *CD proceedings of NASA Fundamental Aeronautics 2007 Annual Meeting*. 2007.
- [46] Khan, F., et al., *Effect of various surface preparation techniques on the delamination properties of vacuum infused Carbon fiber reinforced aluminum laminates (CARALL): Experimentation and numerical simulation*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017. **31**(11): pp. 5265-5272.
- [47] Apmann, H., et al., *Automated manufacture of fibre metal laminates to achieve high rate of production*. Lightweight Design Worldwide, 2017. **10**(4): pp. 28-33.
- [48] Amorim, H.F., *Pultrusão de Perfis Híbridos Alumínio/Compósito de Matriz Polimérica*, Departamento de Engenharia Mecânica. 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado.
- [49] Lauter, C., et al. *Optimised thermoset matrix systems for the manufacturing of sheet-metal-FRP-hybrid-structures by an optimised resin transfer moulding process*. In *17th European Conference on Composite Materials*. 2016. Munique, Alemanha.
- [50] Pereira, C., et al. *Processing of Hybrid Metal/Composite Systems*. In *21st International Conference on Composite Materials*. 2017. Bolonha, Itália.
- [51] Monge, J.M.de.S., *Sistema Híbrido Metal/Compósito*, Departamento de Engenharia Mecânica. 2018, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado.

- [52] Dymacek, P., *Fiber-metal laminates steel-C/Epoxy : Manufacture and Mechanical Properties*. 2002, Brno University of Technology. Tese de Doutorado.
- [53] Alderliesten, R., *Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates*. Springer. 2017. ISBN 978-331956227-8. pp. 22.
- [54] Viandier, A., et al., *Degradation Analysis of Fiber-Metal Laminates Under Service Conditions to Predict Their Durability*. UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science, 2015: pp. 49-58.
- [55] Liu, Q., et al., *An experimental study on fatigue characteristics of CFRP-steel hybrid laminates*. Materials & Design, 2015. **88**: pp. 643-650.
- [56] Dlugosch, M., et al. *Experimental Investigation of Automotive Components Consisting of Hybrid FRP-Metal-Material Systems Under Dynamic Loading*. In *Euro Hybrid Materials and Structures*. 2016. Kaiserslautern, Alemanha. pp. 63-68.
- [57] Langdon, G. and L. Rowe. *The response of steel-based fibre-metal laminates to localised blast loading*. in *Proceedings of 17 th International Conference on Composite Materials, Edinburgh*. 2009.
- [58] Hausmann, J., P. Naghipour, and K. Schulze, *Analytical and numerical residual stress models for fiber metal laminates—comparison and application*. Procedia Materials Science, 2013. **2**: pp. 68-73.
- [59] Prussak, R., et al. *Experimental Investigations on Residual Stresses During the Fabrication of Intrinsic CFRP-Steel Laminates*. In *Euro Hybrid Materials and Structures* 2016. Kaiserslautern, Alemanha. pp. 22-28.
- [60] Suárez Bermejo, J.C. and M.A. Herreros Sierra, *New Fiber-Metal Hybrid Laminated Material, MALECON*. In *47º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima*, España. 2008.
- [61] Cantwell, W., *The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene*. Composites Science and Technology, 2000. **60**(7): pp. 1085-1094.
- [62] Reyes, G., *Manufacturing of New Low-Cost Lightweight Thermoplastic-Composite/Metal Hybrid Systems*. University of Michigan-Dearborn.
- [63] Osiecki, T., et al. *Thermoplastic fiber reinforced/metal-hybrid laminates for structural lightweight applications*. in *Proc. 23rd Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-23)*. 2015.
- [64] Yüksel, F., R. hinterhölzl, and K. Drechsler. *Experimental Investigation of Direct Adhesion of CFR-Thermoplast on Steel*. In *Euro Hybrid Materials and Structures* 2016. Kaiserslautern, Alemanha. pp. 247-250.
- [65] Gall, M., et al. *Delamination in UD-CFRP Steel Hybrid Laminates - Part 1: Method Implementation and Interface Variation*. In *Euro Hybrid Materials and Structures*. 2016. Kaiserslautern, Alemanha. pp. 8-11.
- [66] Jesus, A.M.P.de, *Apontamentos de Processos de Fabrico I - Furação e Furadoras*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2017.
- [67] Phadnis, V., A. Roy, and V. Silberschmidt. *Finite element analysis of drilling in carbon fiber reinforced polymer composites*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. IOP Publishing.
- [68] Greer, T. *Cutting Tool Technology*. 2018. Acedido em Março de 2018, em: <http://slideplayer.com/slide/12326979/>.

- [69] Gardiner, G. *Hole Ambitions! Optimize? Customize?* 2012. Acedido em Março de 2018, em: <https://www.compositesworld.com/articles/hole-ambitions-optimize-customize>.
- [70] Won, M. and C. Dharan, *Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002. **124**(4): pp. 778-783.
- [71] Durão, L., et al., *Influência dos parâmetros de maquinagem no dano de placas compósitas*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. 2009.
- [72] Hocheng, H. and C. Tsao, *The path towards delamination-free drilling of composite materials*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **167**(2-3): pp. 251-264.
- [73] Wang, G.-D., S.K. Melly, and N. Li, *Using dampers to mitigate thrust forces during carbon-fibre reinforced polymer drilling: Experimental and finite element evaluation*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017. **37**(1): pp. 60-74.
- [74] Poulachon, G., et al., *Hole surface topography and tool wear in CFRP drilling*. Procedia CIRP, 2016. **45**: pp. 35-38.
- [75] Wang, C., et al., *Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates*. Composites Part B: Engineering, 2017. **109**: pp. 10-22.
- [76] Holmes, M., *Synthetic diamond composite tooling material provides step change in aerospace*. Reinforced Plastics, 2015. **59**(6): pp. 291-293.
- [77] Durão, L., et al., *Avaliação da delaminação após furação em compósitos laminados*. Encontro Nacional de Materiais e Estruturas Compósitas (ECMEC2010), 2010.
- [78] Fernandes, M. and C. Cook, *Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. **46**(1): pp. 70-75.
- [79] Zitoune, R., V. Krishnaraj, and F. Collombet, *Study of drilling of composite material and aluminium stack*. Composite Structures, 2010. **92**(5): pp. 1246-1255.
- [80] Pecat, O. and E. Brinksmeier, *Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening*. Procedia Cirp, 2014. **13**: pp. 1-7.
- [81] Ramulu, M. and M. Spaulding, *Drilling of hybrid titanium composite laminate (HTCL) with electrical discharge machining*. Materials, 2016. **9**(9): pp. 746.
- [82] Wang, C.-Y., et al., *Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015. **16**(8): pp. 1689-1697.
- [83] Kuo, C.-L., et al., *The effect of cutting speed and feed rate on hole surface integrity in single-shot drilling of metallic-composite stacks*. Procedia CIRP, 2014. **13**: pp. 405-410.
- [84] Shyha, I., et al. *Drilling of titanium/CFRP/aluminium stacks*. In *Key Engineering Materials*. 2010. Trans Tech Publications. **447-448**: pp. 624-633.
- [85] Brinksmeier, E. and R. Janssen, *Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002. **51**(1): pp. 87-90.
- [86] Gardiner, G. *One-shot dry drilling of stacked materials*. 2014. Acedido em Abril de 2018, em: <https://www.compositesworld.com/articles/machining-update-one-shot-dry-drilling-of-stacked-materials>.

- [87] Tools, M. *Catálogo de Ferramentas* 2018. Acedido em Março de 2018, em: http://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/catalog_en/c007a_1.pdf.
- [88] Novator. *The inventor of Orbital Drilling*. Acedido em Março de 2018, em: <http://www.novator.eu/>.
- [89] Cormorant, S. *Catálogo - Ferramentas Sólidas Rotativas*. 2018. Acedido em Abril de 2018, em: http://sandvik.ecbook.se/se/pt/solid_round_tools_2018/.
- [90] Pereira, R.B.D., et al., *A review of helical milling process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017. **120**: pp. 27-48.
- [91] Denkena, B., D. Boehnke, and J. Dege, *Helical milling of CFRP–titanium layer compounds*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008. **1**(2): pp. 64-69.
- [92] Voss, R., M. Henerichs, and F. Kuster, *Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP)*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016. **65**(1): pp. 137-140.
- [93] Wang, H., X. Qin, and H. Li, *Machinability analysis on helical milling of carbon fiber reinforced polymer*. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2015. **9**(5): pp. 35-46.
- [94] Haiyan, W., et al., *Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber–reinforced plastics*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013. **227**(1): pp. 62-74.
- [95] Wang, H., et al., *Optimization of Cutting Parameters in Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Polymer*. Transactions of Tianjin University, 2018. **24**(1): pp. 1-10.
- [96] Sadek, A., M. Meshreki, and M. Attia, *Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012. **61**(1): pp. 123-126.
- [97] Ishida, T., et al., *Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen*. Procedia Cirp, 2014. **24**: pp. 13-18.
- [98] Zhou, L., et al., *Hole diameter variation and roundness in dry orbital drilling of CFRP/Ti stacks*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **87**(1-4): pp. 811-824.
- [99] Sandvik Coromant. *Circular Ramping*. Acedido em Março de 2018, em: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/application/overview/holes_and_cavities/circular_ramping/pages/default.aspx.
- [100] Ozturk, O.M., *Mechanics and dynamics of orbital drilling operations*. 2017, University of British Columbia, Canadá. Tese de Mestrado.
- [101] Brinksmeier, E., S. Fangmann, and I. Meyer, *Orbital drilling kinematics*. Production Engineering, 2008. **2**(3): pp. 277-283.
- [102] ISMAIL, S.O., et al. *Analysis and impacts of chips formation on hole quality during fibre-reinforced plastic composites machining*. in *Advances in Manufacturing Technology XXX: Proceedings of the 14th International Conference on Manufacturing Research, Incorporating the 31st National Conference on Manufacturing Research, September 6–8, 2016, Loughborough University, UK*. 2016. IOS Press.

- [103] Reyes, G. and Gupta, S., *Manufacturing and mechanical properties of thermoplastic hybrid laminates based on DP500 steel*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. **40**(2): pp. 176-183.
- [104] Liu, J., et al., *An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP)*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014. **86**: pp. 89-103.
- [105] *DMG MORI DMU eVo series*. 2018. Acedido em Agosto de 2018, em: http://media.dmgmori.com/media/epaper/DMU_eVo-uk/index.html.
- [106] Neto, N.F.M., *Orbital drilling of Titanium alloys for aeronautics applications. Experimental studies.*, Departamento de Engenharia Mecânica. 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado.
- [107] Wang, H., et al., *A comparative study on helical milling of CFRP/Ti stacks and its individual layers*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **86**(5-8): pp. 1973-1983.
- [108] Bayraktar, S. and Turgut, Y., *Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon-fiber reinforced polymer composite material*. Materials and Technology, 2016. **50**(4): pp. 591-600.

Anexo A - Forças Axiais Críticas para Vários Tipos de Broca [72]

<i>Tipo de Broca</i>	<i>Força Crítica</i>
<i>Saw Drill</i>	$F_c = \pi \sqrt{\frac{32G_{Ic}M}{1-2s^2+s^4}}$
<i>Candle Stick Drill</i>	$F_c = \pi(1+\alpha) \sqrt{\frac{32G_{Ic}M}{1+\alpha^2(1-2s^2+s^4)}}$
<i>Core Drill</i>	$F_c = \pi \left\{ \frac{32G_{Ic}M}{1 - \left[\left(2 - 2\beta + \frac{3\beta^2}{2} \right) + \frac{4(1-\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \right] s^2 + \left[\frac{(2-4\beta+5\beta^2-3\beta^3+\beta^4)}{2} + \frac{2(1-\beta)^2(2-2\beta+\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \right] s^4} \right\}^{\frac{1}{2}}$
<i>Core-Center Drill</i>	$F_c = \pi(1+\gamma) \left\{ \frac{32G_{Ic}M}{1 + \gamma^2 \left\{ 1 - \left[\left(2 - 2\beta + \frac{3\beta^2}{2} \right) + \frac{4(1-\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \right] s^2 + \left[\frac{(2-4\beta+5\beta^2-3\beta^3+\beta^4)}{2} + \frac{2(1-\beta)^2(2-2\beta+\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \right] s^4 \right\}} \right\}^{\frac{1}{2}}$
<i>Core-Saw Drill</i>	$F_c = \pi(1+\eta) \left\{ \frac{32G_{Ic}M}{1 - 2(1-\beta-\phi)^2 s^2 + (1-\beta-\phi)^4 s^4 + \eta^2 \left\{ 1 - \left[\left(2 - 2\beta + \frac{3\beta^2}{2} \right) + \frac{4(1-\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \right] s^2 + \left[\frac{(2-4\beta+5\beta^2-3\beta^3+\beta^4)}{2} + \frac{2(1-\beta)^2(2-2\beta+\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \right] s^4 \right\}} \right\}^{\frac{1}{2}}$

Com:

M – Rigidez por unidade de largura do material

s – Rácio entre o raio da broca e o raio da zona delaminada

 α – Rácio entre a força central concentrada e a força distribuída na periferia β – Rácio entre a espessura e o raio da broca ϕ – Rácio entre a espessura e o raio da broca interior e o raio interior da broca de núcleo η – Rácio entre a força periférica e a força central concentrada

Anexo B - Ficha Técnica do Aço SSAB Docol 600 DP



Data sheet 2102 Docol 600DP 2017-04-19

Docol 600DP

General Product Description

Docol 600DP dual-phase steel has good formability and weldability and is suitable for car safety components such as seat racks. This steel undergoes special heat treatment in a continuous annealing line, producing a two-phase structure. Ferrite that imparts unique forming properties represents one phase, and martensite that accounts for the strength represents the other phase.

Dimension range

Docol CR350Y600T-DP / UC: thickness 0.50-2.10 mm, width up to 1527 mm, length up to 8500 mm.

Slitting to narrow coils and cutting to sheets are available upon request.

Mechanical Properties

Steelgrade	Coating	Yield strength $R_{p0.2}$ (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_{80} (min %)	Min. inner bending radius for 90 °
Docol CR350Y600T-DP	UC	350- 450	600- 700	16	0.0xt

The mechanical properties are tested transverse to the direction of rolling.

Chemical Composition

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al (min %)	Nb+Ti (max %)
0.12	0.40	1.00	0.025	0.010	0.015	0.10

Tolerances

Cold-rolled (UC): Tolerances in accordance to EN10131.

Customized dimensional and shape tolerances are available on request.

Coatings and surface treatments

Surface treatments

All surface treatments are in accordance with RoHS directive (2011/65/EU) and do not contain Chromium VI (Cr6+). Surface treatments provide only temporary surface protection during transportation and storage. In order to avoid corrosion damages, care must be taken to keep the products dry during transportation and storage. If they become wet, they must be separated and situated so that they are dried quickly.

Surface coating	Available surface treatment
UC (Cold-rolled)	Oiled
UC (Cold-rolled)	Unprotected

Fabrication and Other Recommendations

For information concerning fabrication, see SSAB's brochures on www.ssab.com or consult Tech Support, techsupport@ssab.com.

Appropriate health and safety precautions must be taken when bending, welding, cutting, grinding or otherwise working on the product.

Contact Information

www.ssab.com/contact

Anexo C - Ficha Técnica do Pré-Impregnado Usado



MITSUBISHI RAYON CO., LTD.

PYROFIL™

Mechanical Properties of PYROFIL™ Woven Fabric Composite

Product Description	: TR3523 361GMP
Fabric Style	: 2x2 Twill
Carbon Fiber	: TR 30S 3L
Resin	: #361
FAW	: 200g/m ²
Resin Content	: 40 weight %
Curing Condition	: Compression molding for 5 minutes at 140°C pressure 4MPa (Gauge)

Mechanical Properties		Unit	Value	Method	
Tensile Properties					
[0°/90°]	Strength	MPa	624	ASTM D 3039	
Warp direction	Modulus	GPa	80		
	Strain	%	1.0		
[90°/0°]	Strength	MPa	580	ASTM D 3039	
Fill direction	Modulus	GPa	61		
	Strain	%	0.9		
Compressive Properties					
[0°/90°]	Strength	MPa	563	ASTM D 3410	
Warp direction	Modulus	GPa	53		
	Strain	%	1.2		
[90°/0°]	Strength	MPa	570	ASTM D 3410	
Fill direction	Modulus	GPa	55		
	Strain	%	1.2		
Flexural Properties					
[0°/90°]	Strength	MPa	808	ASTM D 790	L/d=40
Warp direction	Modulus	GPa	54		
	Strain	%	1.7		
[90°/0°]	Strength	MPa	805	ASTM D 790	L/d=40
Fill direction	Modulus	GPa	55		
	Strain	%	1.8		
Shear Properties					
In-Plane Shear Strength		MPa	85	ASTM D 3518	
Shear Modulus		GPa	3.7		
Interlaminar Shear Strength		MPa	54	ASTM D 2344 L/D=4	

Note) Test environment 23±2°C, 50±5%RH

Mechanical properties are calculated at actual of thickness.

MITSUBISHI RAYON CO., LTD.
Carbon Fiber and Composite Materials Division

Headquarter Office: 1-1, Marunouchi 1-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8253, Japan
phone: +81-3-6748-7512 facsimile +81-3-3286-1380

Product data and parameters cited in this publications have been obtained in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. laboratories using the material under carefully controlled conditions. The information, therefore, is believed to be indicative of representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. can not accept responsibility for the misapplication of these products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

PYROFIL TR3523 361GMP 08/17/2015 CAT II

Anexo D - Ficha Técnica da Resina Epóxico PYROFIL #360/361

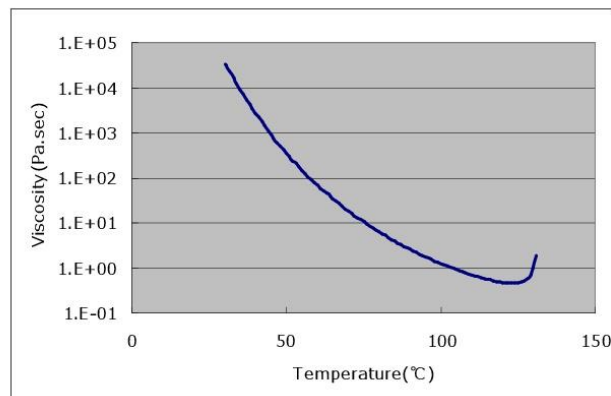
2. Neat Resin Properties

· Properties of **PYROFIL**™ #360 / #361

Properties		Unit	Value
Gel time at 130°C		sec	200
Cured Resin ※	$G' - T_g$	°C	170
	Density	g/cm ³	1.20

※ Curing condition : 10min. at 140°C

· Viscosity (Rheometric)



Product data and parameters cited in this publication have been obtained in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. laboratories using the material under carefully controlled conditions. The information, therefore, is believed to be indicative of representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. can not accept responsibility for the misapplication of these products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

(3/6) PYROFIL #360/#361 01/16/2014
CAT III

4. Curing Conditions

The recommended cure cycle is 5 min at 140°C, at a pressure between 3 and 10 MPa. Alternative cure cycles can be used:

	Curing temp.	Hold time
#1	120°C	15min
#2	130°C	7min
#3	140°C	5min
#4	150°C	3min

With any condition #1 through #4, **PYROFIL™** #360 / #361 can be cured in the same way as our conventional curing conditions (for example, 130°C for 60 min.).

5. ShelfLife

The material should be used within the shelf lives described below to keep good processability (tackiness and drapability).

Storage Temp.	Shelf Life
20°C	2 weeks
0°C	3 months
-18°C	6 months

Product data and parameters cited in this publication have been obtained in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. laboratories using the material under carefully controlled conditions. The information, therefore, is believed to be indicative of representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. can not accept responsibility for the misapplication of these products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

(5/6) PYROFIL #360/#361 01/16/2014
CAT III

Anexo E - Ficha Técnica da Resina Epóxico *Nanopith* ER 150_30



ER 150_30 A/B/C 1/2/3

Description

Is formulated epoxy resin matrix, specifically designed for HIGH – TG prepreg system with LONG SHELF LIFE, SHORT CURE CYCLES and VERY CUSTOMIZABLE REACTIVITY and TACK. It is a very versatile matrix which could be pre-impregnated into carbon, glass, aramid or basalt fibers and is allowing a range of processing temperatures from 120°C up to 150°C.

System modification

ER 150_30 A1/2/3 (1 low tack / 2 medium tack / 3 high tack)

Curing Temp.	Gel Time	Curing Time	Tg – DSC (ISO 11357-2, 10K/min.)
120 °C	10-12 min.	60 min.	130-140 °C
130 °C	5-7 min.	60 min.	135-145 °C
140 °C	3-4 min.	60 min.	140-150 °C
150 °C	3 min.	30 min.	135-145 °C

ER 150_30 B1/2/3 (1 low tack / 2 medium tack / 3 high tack)

Curing Temp.	Gel Time	Curing Time	Tg – DSC (ISO 11357-2, 10K/min.)
120 °C	13-16 min.	60 min.	125-135 °C
130 °C	7-9 min.	60 min.	135-145 °C
140 °C	4-5 min.	60 min.	140-150 °C
150 °C	4 min.	30 min.	135-145 °C

ER 150_30 C1/2/3 (1 low tack / 2 medium tack / 3 high tack)

Curing Temp.	Gel Time	Curing Time	Tg – DSC (ISO 11357-2, 10K/min.)
120 °C	23-28 min.	60 min.	120-130 °C
130 °C	12-15 min.	60 min.	130-140 °C
140 °C	7-9 min.	60 min.	140-150 °C
150 °C	7 min.	30 min.	135-145 °C

- COLOUR: transparent
- DENSITY: 1,18 g/cm³

Curing conditions

Typical autoclave cure cycle

1. Apply the full vacuum (approx. 0,9 bar).
2. Apply 1 - 7 bar gauge autoclave pressure.
3. Heat at 1 - 3 °C/min. to 120 - 150 °C
4. Hold at 120 - 150 °C for 30 - 60min.
5. Cool at 2 - 5 °C/min.
6. Vent autoclave pressure when a part reaches 70 °C or below.

Cure cycles can be used, pressure 1 - 7 bar, heat up rate 1 - 3 °C/min., cooling rate 2 - 5 °C/min.

Storage and Handling

- Shelf life¹: 12 months
- Out life²: > 8 weeks

¹ Shelf Life: the maximum storage life for prepreg, upon receipt by the customer, when stored continuously, in a sealed moisture-proof packing, at -18°C/0°F.

² Out life: the maximum accumulated time allowed at room temperature (23°C) between removal from the freezer and cure.

Prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before unpack which preventing condensation. (A full reel in its packing can take up to 48 hours).

Tensile test (ER 150_30 B2)

(ISO 527-2) Tested at 23°C
Cure cycle: 1h 140°C

Tensile strength	90 – 100 MPa
Elongation at break	5 – 6 %
Tensile modulus	3 100 – 3 200 MPa

Flexural test (ER 150_30 B2)

(ISO 178) Tested at 23°C
Cure cycle: 1h 140°C

Flexural strength	140 – 145 MPa
Elongation at break	7 -8 %
Flexural modulus	3 000 – 3 100 MPa

Fracture properties bend notch test (ER 150_30 B2)

(ISO 13586) Tested at 23°C

Cure cycle: 1h 140°C	
Fracture toughness K_{Ic}	0.65 - 0.70 MPa Öm
Fracture energy G_{Ic}	170 -190 J/m ²

Water absorption (ER 150_30 B2)

(ISO 62) Cure cycle: 1h 140°C

1h in water at 100°C	0.38 - 0.42 %
----------------------	---------------

Anexo F - Ficha Técnica do Dinamómetro Utilizado

Force

KISTLER
measure. analyze. innovate.

4-Component Dynamometer for Cutting Force Measurement in Drilling

Type 9272

Four-component dynamometer for measuring a torque M_z and the three orthogonal components of a force. The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces and torques to be measured.

- Compact and robust multicomponent force measuring instrument
- Suitable for cutting force measurements when drilling
- Universal use

Description

The dynamometer consists of a four component sensor fitted under high preload between a base plate and a top plate. The four components are measured practically without displacement. It must be taken into account that combined and eccentric loads may reduce the measuring ranges. The sensor is mounted ground-isolated. Therefore ground loop problems are largely eliminated. The dynamometer is rustproof and protected against penetration of splash water and cooling agents. Together with the connecting cable Type 1677A5/1679A5 it corresponds to the protection class IP 67.

Application Examples

- Measuring feed force, deflective force and moment when drilling, threadcutting etc.
- Cutting force measurements while milling and grinding
- Cutting force measurements while turning
- Testing torque wrenches
- Testing springs (torsion)
- Measurements on small thrust bearings, friction clutches etc.
- Measuring starting torques on fractional horsepower and stepping motors
- Ergonomic measurements



Technical Data

Measuring range	F_x, F_y	kN	-5 ... 5 ¹⁾
	F_z	kN	-5 ... 20 ²⁾
	M_z	N·m	-200 ... 200
Calibrated measuring range			
100 %	F_x, F_y	kN	0 ... 5
	F_z	kN	0 ... 20
	M_z	N·m	0 ... 200
10 %	F_x, F_y	kN	0 ... 0,5
	F_z	kN	0 ... 2
	M_z	N·m	0 ... 20
Overload	F_x, F_y	kN	-6/6
	F_z	kN	-6/24
	M_z	N·m	-240/240
Max. bending moment	M_x, M_y	N·m	-400 ... 400
Threshold	F_x, F_y	N	<0,01
	F_z	N	<0,02
	M_z	mN·m	<0,2
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈-7,8
	F_z	pC/N	≈-3,5
	M_z	pC/N·m	≈-160
Linearity, all ranges		% FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤1

Page 1/3

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2005, Kistler Instrumente AG, PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur
Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

4-Component Dynamometer – for Cutting Force Measurement in Drilling, Type 9272

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	$\leq \pm 2$
	$F_x \rightarrow F_{xy}$	%	$\leq \pm 1$
	$F_{xy} \rightarrow F_x$	%	$\leq \pm 2$
	$F_z \rightarrow M_t$	mN-m/N	$\leq \pm 0,2$
	$M_t \rightarrow F_z$	N/N-m	$\leq \pm 1$
	$F_{xy} \rightarrow M_t$	mN-m/N	$\leq \pm 0,7$
Rigidity	$M_t \rightarrow F_{xy}$	N/N-m	$\leq \pm 0,5$
	c_x, c_y	kN/ μ m	$\approx 0,4$
	c_z	kN/ μ m	≈ 2
	cM_t	N-m/ μ rad	$\approx 0,7$
Natural frequency (mounted on rigid base)	$f_n(x,y)$	kHz	$\approx 3,1$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 6,3$
	$f_n(M_t)$	kHz	$\approx 4,2$

Operating temperature range	°C	0 ... 70
Temperature coefficient of sensitivity	%/°C	-0,02
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF
	M_t	pF
Insulation resistance (20 °C)	Ω	$> 10^{13}$
Ground isolated	Ω	$> 10^9$
Connector	Fischer flange 9-pole neg.	
Degree of protection EN60529	–	IP67 ³⁾
Weight	kg	4,2

¹⁾ Force application point inside and max. 25 mm above top plate area

²⁾ Force application point max. 20 mm from center

³⁾ With connecting cable Types 1677A5, 1679A5

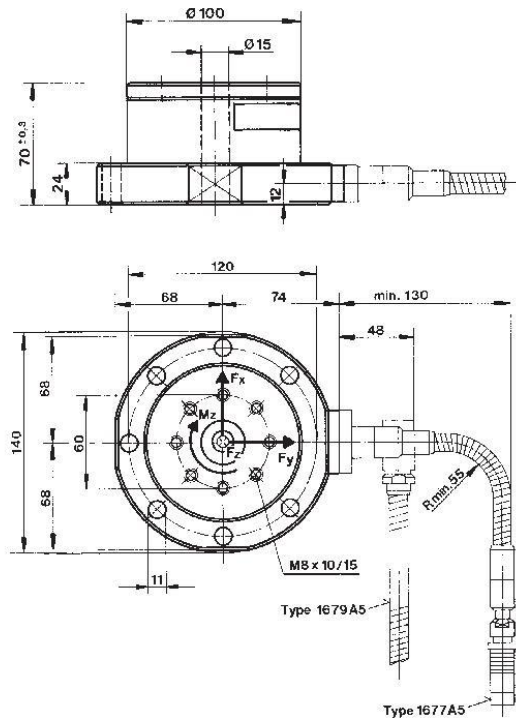


Fig. 1: Dimensions Dynamometer Type 9272

Technical Data

Dynamometer Type 9272 with Mounted Tool Holder Type 9404
for turning; force acting onto point A

Range	F_x, F_y	kN	-2 ... 2
	F_z	kN	0 ... 4
Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	$\leq \pm 5$
	$F_x \rightarrow F_{xy}$	%	$\leq \pm 2$
	$F_{xy} \rightarrow F_x$	%	$\leq \pm 5$
Natural frequency (mounted on flanges) with tool holder	$f_n(x,y)$	kHz	$\approx 1,5$
	$f_n(z)$	kHz	≈ 4

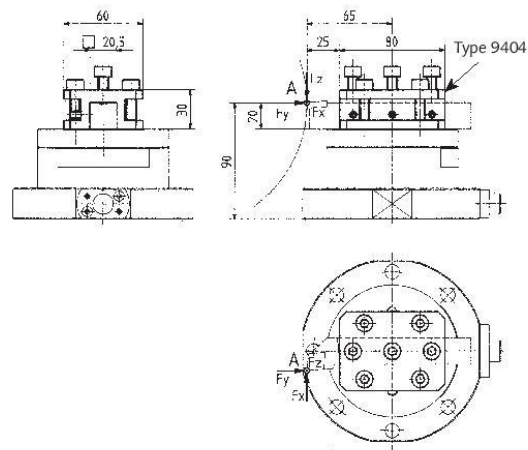


Fig. 2: Dimensions Dynamometer Type 9272 with mounted tool holder Type 9404

9272_000-153e-11.05

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

Page 2/3
©2005, Kistler Instrumente AG, PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur
Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

4-Component Dynamometer – for Cutting Force Measurement in Drilling, Type 9272

KISTLER
measure. analyze. Innovate.

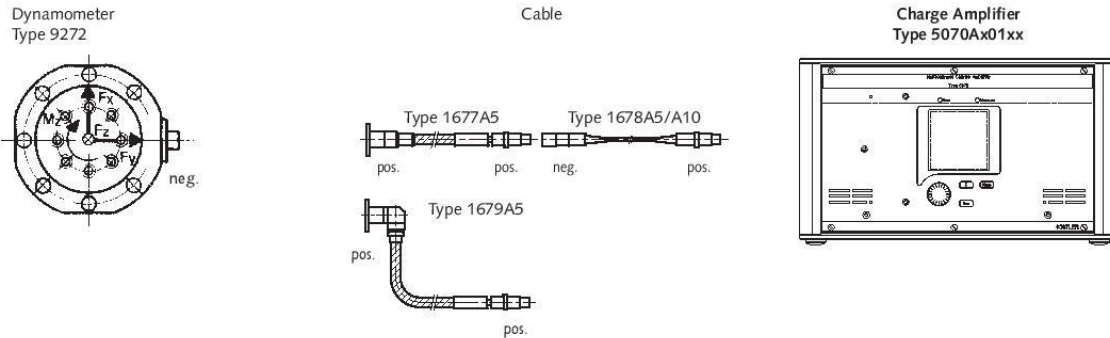
4-Component Force-Torque Measurement M_z , F_x , F_y , F_z with 4-Channel Charge Amplifier

Fig. 3: Example of a measuring system with dynamometer Type 9272

Mounting

The dynamometer may be mounted with screws or claws on any clean, face-ground supporting surface, such as the table of a machine tool for example. Uneven supporting surface may set up internal stresses, which will impose severe additional loads on the sensor and may also increase crosstalk.

For mounting the force-introducing components, such as lathe tools and workpieces, eight M8 mm threaded holes in the cover plate are available. The supporting surfaces for the force-introducing parts must be face-ground to obtain good mechanical coupling to the cover plate.

For satisfactory mounting of lathe tools up to 20x20 mm shank cross section, the tool holder Type 9404 may be used.

This holder is not included in the standard accessories and must therefore be ordered separately.

Signal Conditioning

In addition to the dynamometer, a four-component measuring system needs a multi-core high-insulation connecting cable and four charge amplifier channels.

These convert the charge signals from the dynamometer into output voltages. The output voltage is proportional to the forces and moments occurring.

The multichannel charge amplifier Type 5070A... is ideal for this purpose. For details, see the data sheet 5070A_000-485.

Data Acquisition and Evaluation

Kistler DynoWare is an easy to use universal software and is ideal for multi-component force measurement with dynamometers. For details, see the data sheet 2825A_000-371.

Optional Accessories

- Connecting cable (8 leads)
- Extension cable (8 leads)
- Tool holder

Type

1677A5
1679A5
1678A5
1678A10
9404

Ordering Key

- 4-Component Dynamometer for Cutting Force Measurement in Drilling

Type

9272

9272_000-153e-11.05

Anexo G - Desenhos Técnicos das Peças de Fixação dos Provetes

